

コンテンツへのメタデータバインディング
のための電子透かし技術の研究

中村 高雄

博士（情報学）

総合研究大学院大学
複合科学研究科
情報学専攻

平成 19 年度
(2007)

2008 年 3 月

本論文は総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻に
博士（情報学）授与の要件として提出した博士論文である。

審査委員：

| | | |
|----|----------|--------------------|
| 主査 | 曾根原 登 教授 | 国立情報学研究所／総合研究大学院大学 |
| | 計 宇生 准教授 | 国立情報学研究所／総合研究大学院大学 |
| | 佐藤 真一 教授 | 国立情報学研究所／総合研究大学院大学 |
| | 東倉 洋一 教授 | 国立情報学研究所／総合研究大学院大学 |
| | 山田 茂樹 教授 | 国立情報学研究所／総合研究大学院大学 |
| | 安田 浩 教授 | 東京電機大学／東京大学 |

（主査以外はアルファベット順）

A Study on Digital Watermarking Techniques
to Bind Metadata to Contents

Takao Nakamura

DOCTOR OF
PHILOSOPHY

Department of Informatics
School of Multidisciplinary Sciences
The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

March 2008

A dissertation submitted to
the Department of Informatics,
School of Multidisciplinary Sciences,
The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)
in partial fulfillment of the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Advisory Committee:

| | |
|-------------------------------|--|
| Prof. Noboru Sonehara (Chair) | National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies |
| Assoc.Prof. Yusheng Ji | National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies |
| Prof. Shin'ichi Satoh | National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies |
| Prof. Yohichi Tohkura | National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies |
| Prof. Shigeki Yamada | National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies |
| Prof. Hiroshi Yasuda | Tokyo Denki University/The University of Tokyo |

(Alphabet order of last name except chair)

論文要旨

本論文は、画像や映像といったコンテンツに対して、高度なコンテンツ利用環境の実現に不可欠となるメタデータをコンテンツ自体と結びつける（バインディング）ための電子透かし技術について提案するものである。特に印刷や画面出力などアナログ出力されたコンテンツにおいてまでメタデータとのバインディングをシームレスに保証し、アナログドメインで流通するコンテンツを起点として高度なコンテンツ利用環境を享受可能とすることが目的である。

また、アナログドメインのコンテンツの入力デバイスとして近年幅広く普及したカメラ付き携帯端末の利用について深く検討を行う。一般に電子透かし処理は複雑な画像・映像処理であり、携帯電話機のような計算リソースの乏しい環境では、高速処理とアナログ出力耐性を同時に実現することは従来非常に困難であった。本研究では特にこの点について注目し、課題の解決を図る。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、論文の構成を概観する。

第2章では、本研究に関連する技術及び研究について、電子透かし以外のアプローチとの比較を行って電子透かしアプローチの特徴を示す。また、従来の電子透かし技術について調査を行い、本研究で取り扱う技術的課題についてより詳細かつ具体的な整理を行う。

第3章では、カメラ付き携帯端末を用いたアナログ画像からの関連情報取得システム実現への予備検討として、PCでの動作を前提としたアナログ出力耐性を有する静止画電子透かし手法を用いたクライアント／サーバ方式について検討を行う。まず、アナログ出力耐性を有する電子透かし手法として、画像の空間周波数成分に対して直交符号化された透かし情報を重畳する静止画向け電子透かし手法を示す。提案手法では画像の空間周波数成分（フーリエ係数）の実部と虚部を独立したチャンネルとみなして埋め込みを行うことによって、従来手法であるフーリエ係数の振幅に埋め込みを行う手法に対して拡散率を倍増させることが可能であり、それにより高いノイズ・圧縮耐性を実現する。また、False Positiveについて定量化を行う。評価実験により、印刷出力されたアナログ画像からでも電子透かしの検出が可能であることを確認する。最後に、提案手法を利用したC/Sシステムについて検討を行う。

第4章では、第3章で示したC/S方式における通信処理に伴うコスト問題を本質的に解決するため、カメラ付き携帯端末においてスタンドアロン処理で高速に検出処理が可能な静止画電子透かし方式について示す。提案方式は画像の縁を利用して撮影角度によって生じる幾何歪みの補正をすることで空間同期をとり、さらに安定した特性を有する2次元ブロックパターン変調を用いることにより微小な幾何歪みに対処し、スペクトラム拡散変調によりノイズに対するロバスト性を実現する。さらに、実サービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性（False Positive および Message Error）の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験によって、提案手法は携帯電話機上のJavaアプリケーションとして実装した場合でも700 msec.程度で電子透かし検出処理を完了することができ、また、十分なロバスト性を有することを確認できた。

第5章では、対象メディアを動画へと変え、ディスプレイ上で再生されている動画をカメラ付き携帯端末でビデオキャプチャしながらリアルタイムに検出処理可能な、高速な動画向け電子透かし方式について示す。提案方式は、第4章の方式と同じくキャプチャフレーム中の矩形領域をリアルタイムに検出・追跡することでフリーハンド撮影によって刻々と撮影角度による幾何歪みに対処して空間同期を実現する。電子透かし検出は、連続してキャプチャされるビデオフレームの時間差分を取ることで原画成分を抑圧しS/N比を改善することにより、スペクトラム拡散された電子透かし信号をロバストに検出することが可能である。さらに第4章と同じく、検出透かし情報の信頼性（False Positive および Message Error）の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験により、画面表示された動画にカメラ付き携帯電話機をかざしてリアルタイムにかつロバストに検出可能であることを確認できた。

第6章では、第5章で示した方式の問題であった端末性能依存性を解消しつつ、さらなる耐性向上を実現するリアルタイム検出処理可能な高速な動画向け電子透かし方式について示す。提案方式では、空間同期については第5章の方式と同じく高速矩形検出・追跡手法によって実現される。電子透かし手法としては、時間同期不要であり高いロバスト性を有する単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法) を示し、さらに画素信号領域を対象とするように改良して高速化を図る。さらに第4,5章と同じく、検出透かし情報の信頼性（False Positive および Message Error）の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験により、提案手法は第5章の方式で問題であった端末性能依存性を解消すると同時に、ロバスト性の大幅な向上を実現することを確認できた。これにより電子透かしを用いたサービスの幅広い展開を実

現可能となる。

最後に第7章で本論文の成果をまとめる。

本研究の成果は、アナログ出力された実世界の画像・動画コンテンツから電子透かし検出可能な高耐性かつ高速な電子透かし手法を提案し、特にカメラ付き携帯端末上でスタンドアロン検出処理を可能とする高速性を有すること及び高いロバスト性を有することを、実機を用いた評価実験により実証したこと、さらに、検出透かし情報の信頼性の簡便な定量評価方法を示し、実サービス運用時の際に重要となる検出結果に対する定量的品質保証を可能としたことにある。

Abstract

Digital watermarking technology is used to embed additional information into content with slight modification to render it imperceptible, and then extract that information from the watermark embedded content. Watermarking technology is also characteristically robust against degrading and transforming content, and several interesting approaches enable us to extract watermark information, even from re-digitalized images after an analog output with severe degradation and transformation, e.g. D/A and A/D conversion.

A related service introduction system (RSIS), in which the end-user can obtain service information by sending content ID (or metadata) that was previously bound to the content itself, was proposed. Applying RSIS with watermarking technology as the binding mechanism enables objects in the real world to be linked to those in the cyber world. For example, printed materials can lead to a site on the World Wide Web.

However, watermark detection generally requires a lot of processing power, so personal computers (PCs) are usually used as RSIS terminals. From the viewpoint of service provision where convenience is a must, mobile terminals with analog input devices are preferable to PCs. For example, people can easily retrieve service information, anywhere and anytime, from an advertising display on the street, a screen, image on TV, or a picture in a magazine, whenever a mobile terminal is available. In fact, the number of mobile phone users is increasing every year, and most of the newer mobile phones have cameras. Hence, camera-equipped mobile phones would be highly appropriate as the terminal devices.

This thesis describes digital watermarking techniques for images and videos to bind the metadata to content itself, to assure the bindings even in analog domain, such as printouts of images or video-playbacks on monitors, and consequently sophisticated content-related services will be realized even if the content is distributed in analog domain. And also, we target camera-equipped mobile phones as the device used to input analog content, and propose fast and robust water-

marking techniques for images and videos.

In Chapter 1, we describe the background and purpose of this research, and show the overview of this thesis.

In Chapter 2, the related approaches which do not utilize watermarking technology are discussed, and we clarify the feature of watermarking approach. Also, we present a survey on conventional watermarking techniques for images and videos, and the problems and requirements for this research are clarified.

In Chapter 3, as a preliminary study for RSIS with camera phones, a robust watermarking method for still images on the premise of processing on PCs is presented, and a client/server system using this method is discussed. This method is based on a spread spectrum (SS) modulation and utilizes both the real and imaginary part of frequency coefficients of an image to earn spread ratio twice as many as conventional methods that utilize the amplitude of the frequency coefficients, and consequently realizes high robustness against noises and lossy compression. And also, a quantitative evaluation for false positive detection is presented. Experimental results demonstrate the robustness of this method against analog output such as printouts of images. Finally, a client/server system using this method is discussed.

In Chapter 4, to resolve the problem of response time of the C/S-based approach shown in Chapter 3, we propose a fast watermark detection scheme for camera-equipped mobile phones that realizes standalone processing on mobile phones and is robust against geometrical distortions and noise. The scheme consists of two processes: correcting geometric distortions of the captured image, and detecting watermark information in the corrected image based on SS modulation. Moreover, we introduce a quantitative evaluation method that can indicate watermark detection reliability both of false positives and message errors, which is absolutely essential for providing RSIS services. we implemented this scheme as a Java application on a cellular phone. Experimental results showed that it could be performed in about 700 msec. with sufficient robustness against geometric distortions and noise, which satisfies the requirements for practical use.

In Chapter 5, the target media is changed from still images to videos. we propose a video watermarking scheme for fast, robust detection to develop RSIS for video. To handle spatial synchronization, the scheme uses the rectangular tracking technique as the same way as the scheme in Chapter 4, and realizes the robustness

against freehand shooting with camera phones. In the watermarking algorithm, robust detection against noise is realized, because the watermark information modulated by SS is detected from the inter-frame difference to depress the interference of the original video component. In the same way as the scheme in Chapter 4, we also introduce a quantitative evaluation method that can indicate watermark detection reliability both of false positives and message errors. Finally, we evaluate the scheme's implementation on a mobile phone, and we confirm that the scheme can detect the watermark from the captured videos using camera phones with sufficient robustness, on real-time.

In Chapter 6, we show a video watermarking technique to achieve further robustness and feasibility. The video watermarking technique for mobile phones described in Chapter 5 has a problem of the dependency on video capture rate of each terminal. So, we show the Single Frequency Plane Spread Spectrum (SF-PSS) method, and the SFPSS method is improved to pixel-domain processing for high-speed processing. In the same way as the scheme in Chapter 4 and 5, we also introduce a quantitative evaluation method that can indicate watermark detection reliability both of false positives and message errors. Finally, we evaluate the scheme's implementation on a mobile phone, and we confirm that the proposed scheme can solve the terminal-dependency problem. The same watermark embedded video can be detected by various terminals with different specifications, so RSIS for video can be developed for a wide range of applications. And also we can confirm that the proposed scheme can greatly improve the robustness compared to the conventional scheme.

Finally, in Chapter 7, we conclude the thesis with a summary of the significant results.

目次

| | |
|---|----|
| 論文要旨 | i |
| Abstract | iv |
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 背景 | 1 |
| 1.2 電子透かし技術によるメタデータバインディング | 4 |
| 1.3 カメラ付き携帯端末を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得システム | 6 |
| 1.4 要件整理 | 7 |
| 1.5 技術的課題 | 10 |
| 1.6 本研究の目的 | 11 |
| 1.7 本論文の構成と概要 | 12 |
| 第2章 関連する技術及び研究 | 14 |
| 2.1 電子透かし以外のアプローチ | 14 |
| 2.1.1 バーコード・2次元コード等利用 | 14 |
| 2.1.2 位置情報・時間情報等利用 | 15 |
| 2.1.3 別通信チャネル利用 | 15 |
| 2.1.4 コンテンツマッチング利用 | 16 |
| 2.2 従来の電子透かし技術 | 17 |
| 2.2.1 電子透かしの定義と本研究の対象 | 17 |
| 2.2.2 静止画電子透かし技術 | 19 |
| 2.2.3 動画電子透かし技術 | 21 |
| 2.2.4 電子透かし検出の信頼性 | 23 |
| 2.2.5 従来の研究の問題点 | 24 |
| 第3章 アナログ出力耐性を有する静止画電子透かし技術とC/Sシステム | 28 |
| 3.1 はじめに | 28 |
| 3.2 周波数領域への透かし埋め込み | 29 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.3 | 平行移動による位相差を考慮した透かし検出 | 31 |
| 3.3.1 | 画像の平行移動によるフーリエ変換係数の位相差 | 31 |
| 3.3.2 | 位相差を考慮したオフセット探索と透かし情報検出 | 32 |
| 3.3.3 | 透かし情報検出方法の改良 | 34 |
| 3.4 | 画像の局所的重み付けによる適応的透かし埋め込み | 35 |
| 3.4.1 | 適応的透かし埋め込み方法 | 35 |
| 3.4.2 | 重み行列の作成方法 | 36 |
| 3.5 | 実験結果 | 37 |
| 3.6 | C/S 方式によるカメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの 関連情報取得システムの実現可能性検討 | 46 |
| 3.6.1 | サービス仲介システムの概要 | 47 |
| 3.6.2 | サービス仲介システムにおける電子透かし検出の要件 | 48 |
| 3.6.3 | 実装モデルの検討 | 48 |
| 3.6.4 | 実現例の検討と評価 | 49 |
| 3.7 | 本章のまとめ | 51 |
| 第 4 章 | カメラ付携帯端末向けの高速な静止画電子透かし技術 | 53 |
| 4.1 | まえがき | 53 |
| 4.2 | 要求条件 | 55 |
| 4.2.1 | 高速性 | 55 |
| 4.2.2 | ロバスト性 | 55 |
| 4.3 | 提案する電子透かし方式 | 56 |
| 4.3.1 | 設計方針 | 56 |
| 4.3.2 | 電子透かし埋め込みアルゴリズム | 56 |
| 4.3.3 | D/A, A/D 変換と空間同期 | 59 |
| 4.3.4 | 電子透かし検出アルゴリズム | 60 |
| 4.3.5 | 電子透かし検出の信頼度 | 66 |
| 4.4 | 実験結果 | 69 |
| 4.4.1 | 処理速度 | 70 |
| 4.4.2 | ロバスト性 | 71 |
| 4.5 | 本章のまとめ | 75 |
| 第 5 章 | カメラ付携帯端末向けの高速な動画電子透かし技術：フレーム間差分 法 | 78 |
| 5.1 | はじめに | 78 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 5.2 | 関連技術 | 79 |
| 5.2.1 | 電子透かし以外の手法 | 79 |
| 5.2.2 | 従来の電子透かし技術 | 80 |
| 5.3 | 要件定義 | 81 |
| 5.4 | 提案方式 | 82 |
| 5.4.1 | 電子透かし埋め込み | 82 |
| 5.4.2 | 電子透かし検出 | 82 |
| 5.5 | 電子透かし検出の信頼性評価 | 85 |
| 5.5.1 | False Positive Error | 85 |
| 5.5.2 | Message Error | 86 |
| 5.6 | 実装と評価実験 | 88 |
| 5.6.1 | 実装 | 88 |
| 5.6.2 | 評価実験 | 89 |
| 5.7 | 本章のまとめ | 93 |
| 第 6 章 | カメラ付携帯端末向けの高速な動画電子透かし技術：SFPSS 法 | 94 |
| 6.1 | はじめに | 94 |
| 6.2 | 要件定義 | 96 |
| 6.3 | 従来の映像向けモバイル電子透かし方式 | 97 |
| 6.3.1 | 従来方式における電子透かし埋め込み | 97 |
| 6.3.2 | 従来方式における電子透かし検出 | 98 |
| 6.3.3 | 従来方式の問題点 | 99 |
| 6.4 | SFPSS 法による映像電子透かし | 99 |
| 6.5 | 提案方式 | 101 |
| 6.5.1 | 提案方式における電子透かし埋め込み | 102 |
| 6.5.2 | 提案方式における電子透かし検出 | 102 |
| 6.5.3 | 提案方式による効果 | 104 |
| 6.6 | 検出信頼性 | 105 |
| 6.6.1 | False positive | 105 |
| 6.6.2 | Message error | 105 |
| 6.7 | 評価実験 | 107 |
| 6.7.1 | 映像品質 | 109 |
| 6.7.2 | ロバスト性 | 109 |
| 6.7.3 | 処理速度 | 111 |
| 6.8 | 本章のまとめ | 112 |

| | |
|----------|-----|
| 第 7 章 結論 | 113 |
| 謝辭 | 116 |
| 参考文献 | 118 |
| 研究業績 | 126 |

目 次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | メタデータによるリッチなコンテンツ利用環境 | 1 |
| 1.2 | コンテンツ・メタデータ流通の2階層モデル | 2 |
| 1.3 | コンテンツとメタデータのバインド | 3 |
| 1.4 | コンテンツとメタデータのシームレスなバインド | 4 |
| 1.5 | 電子透かし技術 | 4 |
| 1.6 | cIDfにおけるコンテンツと権利情報のバインディング | 5 |
| 1.7 | PCを利用者端末とするアナログコンテンツからの関連情報取得システム | 6 |
| 1.8 | 本研究のスコップとするアプリケーションシステムのイメージ：カメラ付き携帯電話機を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得システム | 7 |
| 3.1 | 透かし情報の拡散 | 30 |
| 3.2 | 平行移動による位相差 | 31 |
| 3.3 | 原画像による影響 | 32 |
| 3.4 | オフセットレスポンス値のピークと検出オフセット | 33 |
| 3.5 | シンボルレスポンス値のピークと検出シンボル値 | 34 |
| 3.6 | 透かし入り画像と原画像との差分画像(強調) | 38 |
| 3.7 | 埋め込み強度と PSNR | 39 |
| 3.8 | 透かし入り画像 (lena) からの検出結果 | 40 |
| 3.9 | シンボルレスポンスの分布 (白線は $N(0,1)$) | 41 |
| 3.10 | 部分画像からの検出結果 | 42 |
| 3.11 | 検出失敗および成功部分画像 (128 × 128 画素) | 43 |
| 3.12 | JPEG 圧縮画像からの検出結果 | 44 |
| 3.13 | 階調変換画像 (2 値画像) | 45 |
| 3.14 | 合成画像 | 46 |
| 3.15 | カメラ付き携帯電話機を用いたサービス仲介システム | 47 |
| 3.16 | クライアント/サーバ型処理分担モデル | 49 |
| 3.17 | 補正マーカを用いた幾何歪み補正と検出可否判定 | 49 |

| | |
|---|----|
| 3.18 撮影角度毎の電子透かし検出性能 | 50 |
| 4.1 電子透かしを用いたコンテンツ関連サービス紹介システム | 54 |
| 4.2 提案方式のモデル | 56 |
| 4.3 電子透かし埋め込み処理フロー | 57 |
| 4.4 2次元パターン変調と重畳 | 58 |
| 4.5 電子透かし埋め込み画像への枠線の付加 | 59 |
| 4.6 矩形検出処理の流れ | 60 |
| 4.7 電子透かし検出処理フロー | 61 |
| 4.8 前処理フィルタの畳み込み行列とその効果 | 62 |
| 4.9 前処理フィルタ処理画像例 | 62 |
| 4.10 幾何変換に対する検出値 d の応答 | 63 |
| 4.11 画像の 90 度回転と検出値行列の関係 | 65 |
| 4.12 透かしなしの場合の ρ の分布のシミュレーション結果 (白線は $N(0,1)$) | 67 |
| 4.13 ρ に対する平均 BER $\mu_p(\rho)$, 標準偏差 $\sigma_p(\rho)$ のシミュレーション結果 | 68 |
| 4.14 (31+1,16) 拡大 BCH 符号 (2 重ビット誤り訂正) の P_C, P_D, P_E | 69 |
| 4.15 ρ に対する Message Error rate P_B | 70 |
| 4.16 矩形検出のロバスト性評価実験で用いた印刷物 (A4 サイズ (21 × 29 cm)) | 72 |
| 4.17 矩形検出結果例: (a)(b): 矩形検出および電子透かし検出の両方とも成功, (c)(d): 矩形検出は成功したが電子透かし検出は失敗 | 73 |
| 4.18 埋め込み強度 $a = \beta$ の枠付き Embedded images (左: Lena, 右: Baboon) | 77 |
| 5.1 動面向けモバイル電子透かし | 79 |
| 5.2 映像フレームへの透かしパターン重畳 | 82 |
| 5.3 電子透かし検出処理フロー | 83 |
| 5.4 1 回の検出試行における検出信頼度指標値 ρ に対する false positive rate P_f | 85 |
| 5.5 1 回の検出試行における検出信頼度指標値 ρ に対する message error rate P_m | 87 |
| 5.6 実験風景 (左) と実験プログラムの実行中画面 (右) | 88 |
| 5.7 評価用動画像: Horse Race(左上), Whale Show(右上), Baseball(下) | 90 |
| 5.8 画質主観評価結果 | 91 |
| 6.1 映像向けモバイル電子透かし | 95 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.2 | 従来方式における電子透かし埋め込み | 97 |
| 6.3 | 従来方式における電子透かし検出 | 98 |
| 6.4 | SFPSS 法による単一時間周波数平面への拡散系列埋め込み | 100 |
| 6.5 | 画素領域を用いた SFPSS 電子透かし埋め込み | 101 |
| 6.6 | 複素相関値からのビット値検出 | 104 |
| 6.7 | 検出信頼度指標値 κ に対する false positive rate P_f (上) と Message error rate P_m (下) | 106 |
| 6.8 | 実験風景 (左) と実験プログラムの実行中画面 (右) | 108 |

表 目 次

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | 電子透かしアプローチと関連技術との比較 | 17 |
| 2.2 | 電子透かし（情報ハイディング）技術の大分類 | 18 |
| 2.3 | 電子透かし検出ステータスの分類 | 23 |
| 4.1 | 処理速度 | 70 |
| 4.2 | 埋め込み強度値と PSNR | 71 |
| 4.3 | 検出結果 (撮影方法を特に指示しなかった場合) | 74 |
| 4.4 | 検出結果 (正面から撮影するよう指示をした場合) | 75 |
| 5.1 | 実装を行なった携帯電話機のスペック | 88 |
| 5.2 | 検出成功率と成功時の平均所要時間 (透かし強度=3) | 92 |
| 5.3 | 原画像のフレーム間差分の Cb 成分の分散 | 92 |
| 5.4 | 原画像と MPEG-2 符号化画像 (透かし無し) との Cb 成分 PSNR 値 | 93 |
| 6.1 | 実装を行なった携帯電話機のスペック | 107 |
| 6.2 | 提案方式の電子透かし検出結果 (14.98 FPS でキャプチャ時) | 110 |
| 6.3 | 従来方式の電子透かし検出結果 (14.98 FPS でキャプチャ時) | 110 |
| 6.4 | 提案方式の電子透かし検出成功率 (4.99 FPS でキャプチャ時) | 111 |
| 6.5 | 従来方式の電子透かし検出成功率 (4.99 FPS でキャプチャ時) | 111 |

第1章 序論

1.1 背景

情報通信技術の発展により、画像や映像といったコンテンツのデジタル化・ネットワーク流通がごく普通のものとなり、コンテンツデータの単なる配送・再生のみならず、DRM (Digital Rights Management) によるコンテンツの権利管理, WWW (World Wide Web) による別のコンテンツへのハイパーリンクなど、従来のアナログメディアでは困難であった豊かなコンテンツ利用環境が実現されてきている。

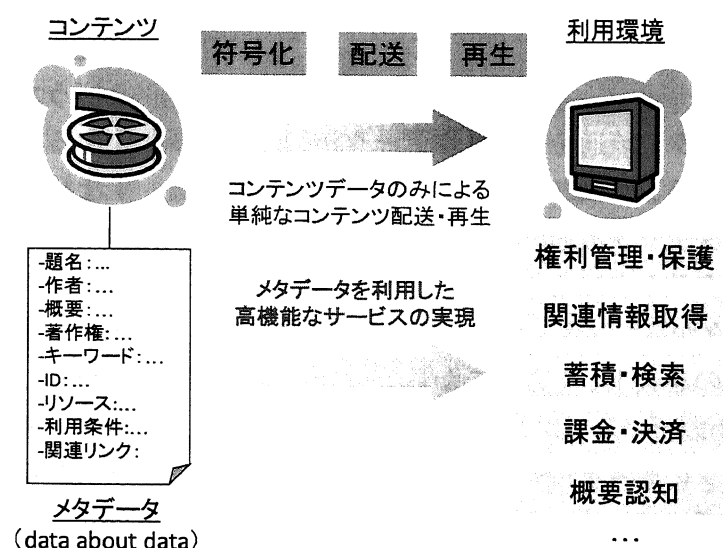


図 1.1: メタデータによるリッチなコンテンツ利用環境

これらは、抽象的に考えるとコンテンツとメタデータをバインドすることによって実現されていると言える。すなわち DRM カプセルコンテンツと権利管理情報をバインド、あるいはコンテンツと別コンテンツへのハイパーリンクとをバインドし、メディアプレーヤや WWW ブラウザといった処理系でコンテンツおよびメタデータを適切に処理することによって実現されている (図 1.1)。また、最近では RSS (RDF Site Summary/Rich Site Summary/Really Simple Syndication) などの技術を用いたメタデータ流通環境も進展しており、メタデータの重要性は更に高まってきている [1, 2]。

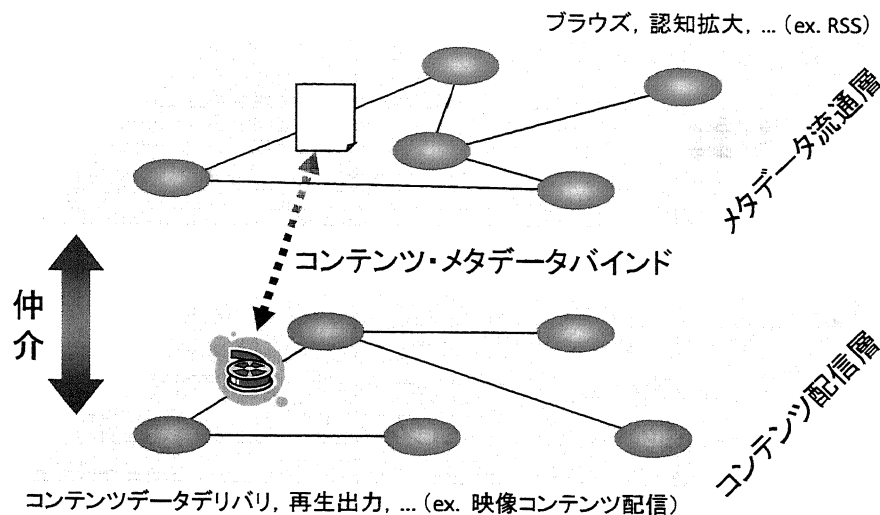
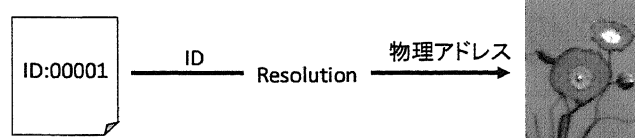


図 1.2: コンテンツ・メタデータ流通の2階層モデル

図 1.2 に曾根原らが提唱しているコンテンツ・メタデータ流通の2階層モデルを示す [3]。このモデルは、コンテンツデータそのものの配信を行うコンテンツ配信層と、メタデータの流通を行うメタデータ流通層の2層からなる。例えば、利用者が未知のコンテンツについてメタデータを通じて知る、すなわちコンテンツの認知拡大がメタデータ流通層で行われる。そしてメタデータにバインドされたコンテンツデータそのものをコンテンツ配信層を通じて取得し鑑賞するといった形で、メタデータからコンテンツデータへの仲介を行う。また逆に、先にコンテンツデータそのものを入手して、そこからメタデータへの仲介が行うこともある。例えば、TVや街頭ディスプレイなどで再生されていたコンテンツに触れて利用者がそのコンテンツに興味を持ったような場合、コンテンツデータからメタデータへの仲介によって、メタデータを用いたリッチコンテンツサービスの利用が可能となる。このようにコンテンツとメタデータ間の双方向の仲介、すなわちコンテンツデータとメタデータのバインディングが重要となる。

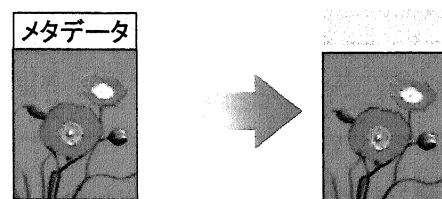
コンテンツとメタデータのバインドの方向性について考えると、一般にメタデータからコンテンツへのリンクを得るのは容易である（リンク情報をメタデータ内に記述しておけばよい）。しかし、コンテンツからメタデータへのリンクを得ることは場合によっては非常に困難である。例えばデジタルコンテンツの場合、データフォーマットが予め用意したメタデータ記述領域などの構造を用いてコンテンツとメタデータをバインドすることが可能であるが、編集加工・フォーマット変換などの過程でメタデータ記述領域が消失することが有り得る。また、画像や音声といったメディアコンテンツは、印刷・画面出力・スピーカ出力などによりア

・メタデータ→コンテンツは容易



・コンテンツ→メタデータの場合

- デジタルデータフォーマットの構造を利用して一体化
- フォーマット変換や意図的な削除などによりメタデータが分離・消失



- アナログ出力には構造がない → メタデータ消失

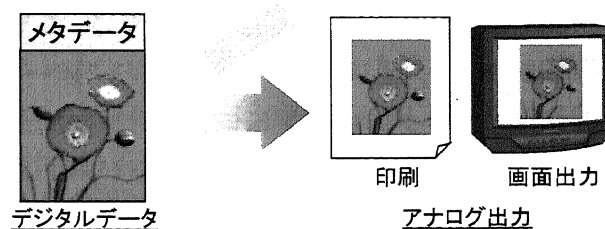


図 1.3: コンテンツとメタデータのバインド

ナログ再生されることによって人間に知覚されるが、アナログ出力されたコンテンツにはもはや構造がない。すなわち、予め規定されたデジタルコンテンツ利用環境に閉じてコンテンツが流通している場合にのみコンテンツへのメタデータのバインドが保証されているが、一旦規定範囲外に流通したコンテンツにおいてはバインドが途絶えてしまう（図 1.3）。

上記の問題を解決し、デジタルコンテンツに対する編集加工やフォーマット変換、あるいはアナログ出力されたコンテンツなど様々なコンテンツ流通過程においてもメタデータとのバインドを保証することができれば、メタデータによる豊かなコンテンツ利用環境をシームレスに大きく広げることができるであろう（図 1.4）。

本研究では、コンテンツへのメタデータバインドをシームレスに保証するための技術として、特に画像及び映像に対するロバスト電子透かし技術について検討を行い、具体的な手法の提案及び評価を通じてその特徴及び有効性を明らかにする。

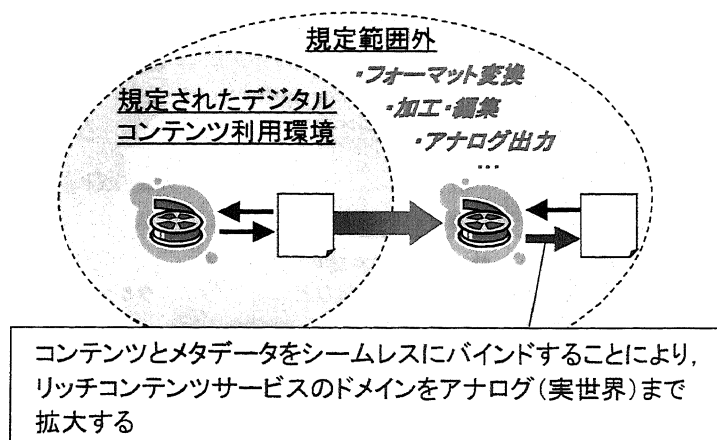


図 1.4: コンテンツとメタデータのシームレスなバインド

1.2 電子透かし技術によるメタデータバインディング

コンテンツ流通過程において、デジタルドメインでのフォーマット変換・非可逆圧縮・編集加工処理や、アナログドメインにコンテンツが流通してもメタデータバインドを保証するための技術として、本研究ではロバスト電子透かしに注目する（図 1.5）。本研究では、広義の電子透かし技術を「コンテンツを僅かに変更して別の情報を埋め込む技術」と定義し、さらにコンテンツに対する編集加工処理や非可逆圧縮、ノイズ付加などに対する耐性を持つものを「ロバスト電子透かし」と呼ぶことにする。

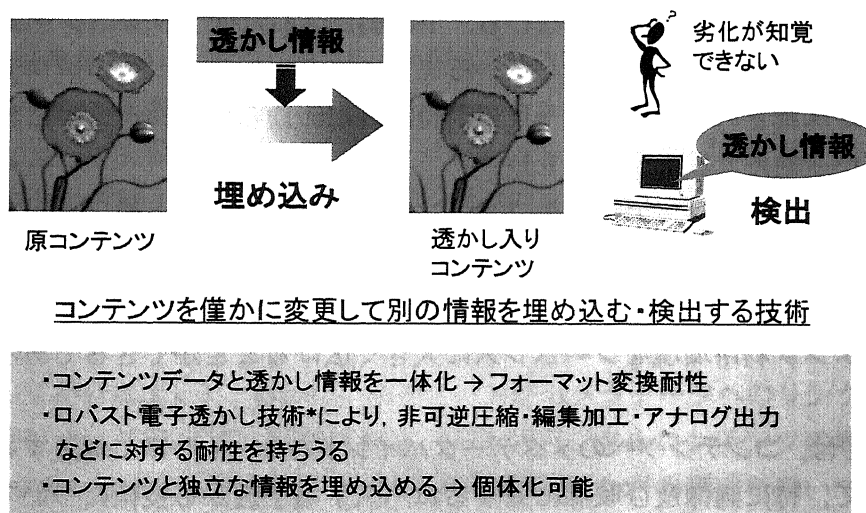


図 1.5: 電子透かし技術

ロバスト電子透かし技術の中には、画像の印刷出力などアナログ出力後でも埋

め込まれた透かし情報を検出可能な、アナログ出力耐性を有するものがある（第2章参照）。アナログ出力耐性を有するロバスト電子透かし技術を用いることで、アナログドメインで流通するコンテンツからでもメタデータを取得することが可能となるであろう。

電子透かし技術は画像や映像といったコンテンツの持つ冗長性を利用し、人間に知覚されないようにして別の情報を埋め込む技術であるとも言える。様々な編集加工や非可逆圧縮、ノイズ不可に対する耐性を実現するため、ロバスト電子透かし技術では一般に埋め込む情報（透かし情報と呼ぶ）の情報量をそれほど大きくすることはできない[6]。そのため、電子透かし技術を用いたメタデータバイディングシステム多くの多くは、メタデータそのものではなく、より情報量の少ない識別子（ID）を透かし情報としてコンテンツ中に埋め込み、電子透かし検出によってIDを読み取った後に、レゾリューションサーバなどを介してIDをキーとして詳細なメタデータを取得する[7]。図1.6に一例としてコンテンツIDフォーラム（cIDf）で検討されているコンテンツと権利情報とのバイディングを示す[8, 9]。この例では、コンテンツの一次利用者がコンテンツ中に電子透かし技術で埋め込まれたコンテンツIDを検出し、これを用いてコンテンツID管理センタに問い合わせを行って、詳細な権利情報を参照することができる。

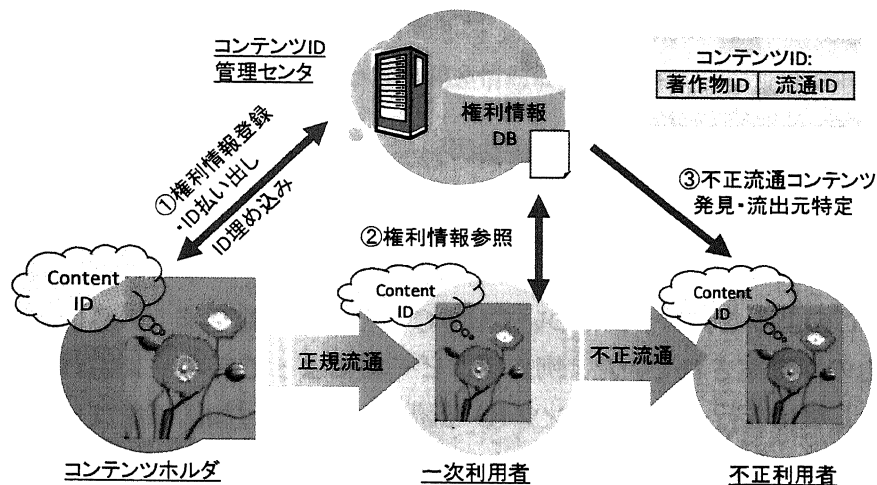


図 1.6: cIDfにおけるコンテンツと権利情報のバイディング

1.3 カメラ付き携帯端末を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得システム

図 1.7 に本研究の検討のベースとなるアナログコンテンツからの関連情報取得システムのイメージを示す。このシステムでは、紙面への印刷や TV 画面への表示などによってアナログ出力された画像・映像コンテンツを、スキャナやカメラなどによって再デジタル化し、コンテンツ中に埋め込まれた電子透かし情報であるコンテンツ ID を検出する。そして検出したコンテンツ ID をサービスレジストリに送り、該コンテンツ ID に対応するメタデータを要求する。ここでメタデータの例として、例えばコンテンツに関連するサービスの情報（オンラインショッピングサイト等）などが考えられる。利用者がメタデータを入手したら、ブラウザなどによりメタデータを利用する。

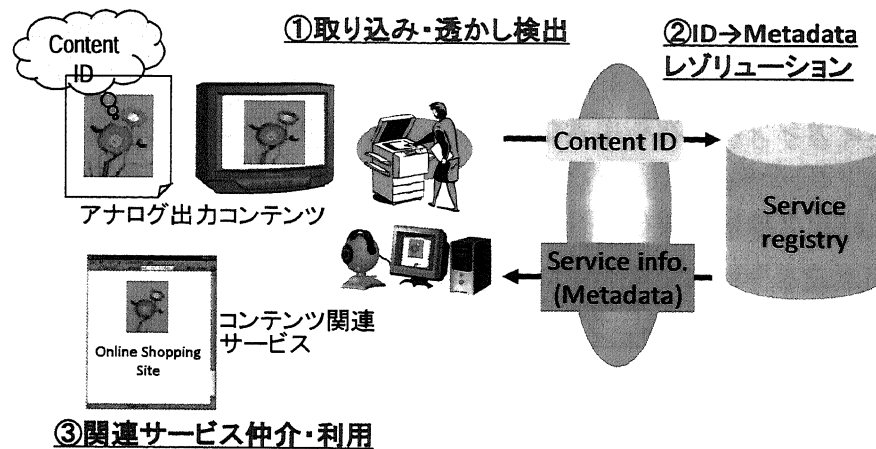


図 1.7: PC を利用者端末とするアナログコンテンツからの関連情報取得システム

従来、このようなシステムについては PC などの計算処理能力の高い端末を前提としたものが提案されていた。例えばコピー機によってスキャンされた画像から電子透かし検出を行ってコンテンツ ID を読み出し、高付加価値なコピー機能を提供するものや、PC に接続された Web カメラで印刷物を撮影してリアルタイムに電子透かし検出を行い、印刷物に関連する Web サイトに接続するシステムなどがある [10, 11, 12, 13]。

本研究では、利用者端末として近年幅広く普及してきたカメラ付き携帯端末、特にカメラ付き携帯電話機を用いることについて深く検討を行う（図 1.8）。2005 年 3 月末での携帯電話総契約数 8,700 万契約のうちカメラ機能を有する携帯電話機は 63.8% 利用されており、台数に換算すると 5,550 万台に上る [14]。また、世界全体で見ても、2005 年におけるカメラ付き携帯電話機の出荷台数は 3 億台に上り、携

携帯電話総出荷台数の38%に相当する（日本では92%）[15]。また、カメラ機能についても、画素数の増加、オートフォーカス装備、動画撮影機能などますます高機能化してきている。図1.8に示すように、アナログコンテンツからの関連情報取得システムの利用者端末としてカメラ付き携帯電話で利用することが可能となれば、町を歩いているときに見かけた看板や、TVに映っている映像や、雑誌や新聞の写真などのアナログ媒体から、いつでもどこでも関連するデジタル情報を取り出すことができ、サービスの可能性が大きく広がるであろう。

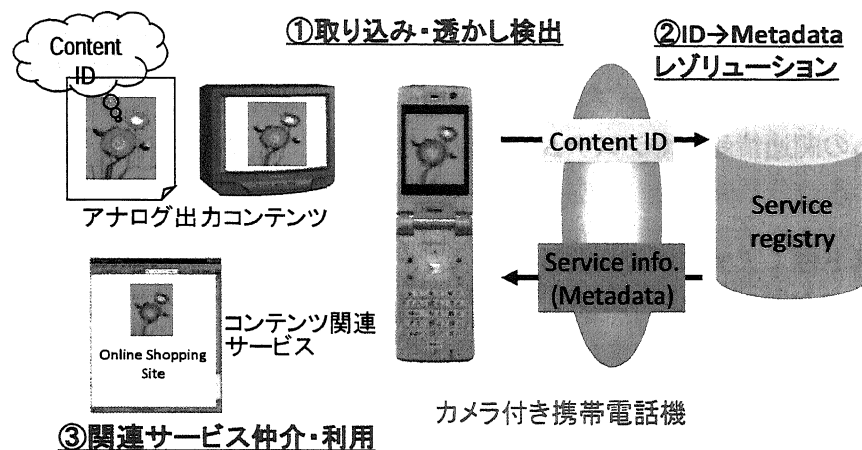


図 1.8: 本研究の Scope とするアプリケーションシステムのイメージ：カメラ付き携帯電話を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得システム

上記のようなアプリケーションの実現のためには、他にもいくつかの技術的アプローチが考えられる。電子透かしアプローチとの比較については第2章で詳しく述べる。

1.4 要件整理

前節で述べたカメラ付き携帯端末を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得システムを実現するために、電子透かし技術に求められる要件を検討する。

まず、ロバスト電子透かし技術に一般的に求められる要件として以下のものが挙げられる。

(1.1) 【不可知性】

電子透かし埋め込みによるコンテンツ品質劣化を低く抑え、知覚困難とすること

(1.2) 【ロバスト性】

想定されるコンテンツ処理が施されても電子透かしの検出を可能とすること

(1.3) 【埋め込み情報量】

想定されるアプリケーションに十分な情報量を埋め込み可能とすること

これらの要件は互いにトレードオフの関係ある。すなわち、コンテンツ品質劣化を一定以下に抑えるようにするとロバスト性が低く、あるいは埋め込み情報量を低くせざるを得ない。電子透かし技術の検討においてはこれらのトレードオフバランスをより高い水準で実現することが求められる。

ここで、本研究のスコープであるカメラ付き携帯端末を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得システムの実現においては、まず要件 (1.2) ロバスト性として、

【ロバスト性：アナログ変換耐性】

透かし入りデジタル画像の、印刷・画面表示などのアナログ出力による劣化、カメラによる再撮影時のアナログノイズ、再デジタル化に伴う劣化等に対する耐性が必要となる

【ロバスト性：撮影条件による同期はずれ耐性】

アナログ画像をカメラで撮影する際の撮影角度による幾何歪みや、印刷物表面の微妙なゆがみ等による空間同期はずれに対する耐性、また、対象が動画コンテンツである場合は、埋め込み開始タイミングと撮影タイミングのずれによる時間同期はずれに対する耐性も必要となる

について、特に考慮する必要がある。

また、電子透かし技術を大別すると、透かし検出の際に原コンテンツを参照するタイプと、原コンテンツの参照を必要としないタイプに分類される。原コンテンツの参照が可能な場合、一般に (1.1)～(1.3) の要件をより高いレベルで実現することが可能である [6] (例えば原コンテンツを参照することで同期はずれを補正することが可能となるため)。しかし、本研究のスコープとするアプリケーションでは、利用者がアナログコンテンツをカメラ付き携帯電話機でキャプチャし、当該コンテンツが何であることを識別し、関連する情報を取得するものであるため、検出時に原コンテンツを参照することはできない。以上から、技術的にはより難易度が高い、

(1.4) 【原コンテンツ非参照】

原コンテンツを参照しないで電子透かし検出を行うこと

も要件とする。

さらに、利便性の観点から、カメラ入力を行ってから電子透かし検出が終了するまでの所要時間が短いことが望ましい。また、検出処理全体で多少の時間がかかる場合では、検出可否などがすぐに分かるなど迅速なフィードバックを行うことも重要である。以上から、

(1.5) 【応答時間】

カメラ入力を行ってから電子透かし検出が終了するまでの所要時間が短いこと。また、検出可否について素早く判別できるなど迅速なフィードバックが可能であること

も必要な要件とする。

最後に、電子透かし検出結果の信頼性の保証が要件として挙げられる。具体的には、電子透かしが埋め込まれていない画像からの検出を試みた結果何らかの情報を正しく検出したと誤って出力したり（以下 False positive と呼ぶ。）、あるいは埋め込まれている情報とは異なる情報を正しく検出したと誤って出力する（以下 Message error と呼ぶ。）ようなエラーを低減することが必要となる。これらのエラーは、本アプリケーションを商用で利用するような場合においては非常にクリティカルである（例えば、広告写真から関連情報を取得したら競合他社製品の情報が表示される、などといった問題が考えられるため）。信頼性保証の観点からは、上記のようなエラーの生起確率を定量的に評価でき、それによりエラー率が一定値以下となるように保証可能とすることが重要である。また、先に述べたとおり、電子透かし検出時には原コンテンツ情報を参照することができない。さらに埋め込まれている透かし情報やその埋め込み強度、あるいはアナログ出力によるノイズについても不明である。検出信頼性評価は、このような情報を利用せず、検出時に取得可能な情報のみから行われなければならない。以上をまとめて、

(1.6) 【電子透かし検出の信頼性保証】

原コンテンツ情報や埋め込まれている透かし情報、埋め込み強度やノイズ強度などの事前情報を用いず、検出時に取得可能な情報のみを用いて、電子透かし検出結果の信頼性を定量的に評価、保証することが可能であること

を要件とする。

より詳細な要件については、対象が静止画であるか動画であるか、あるいは想定するシステム構成等によって異なってくるため、後述する各章において再度詳細な要件を定義することとする。

1.5 技術的課題

前節で述べた要件の充足を検討するにあたり，従来技術では達成困難な技術的課題としてどのようなものがあるかを述べる．

まず，要件 (1.1)～(1.3) は互いにトレードオフの関係にあるため，(1.2) ロバスト性に着目して考えることとする．ロバスト性について，原コンテンツ情報を参照しないで検出を行う従来のロバスト電子透かしにおいては，静止画を印刷しそれをスキャナで再デジタル化しても検出可能な手法 [16] や，あるいは Web カメラなどで撮影した場合でも検出可能な手法 [11, 13] などは存在する．これらは JPEG 等の非可逆圧縮に対する耐性を強化することでアナログノイズ耐性を実現し，また，画像の拡大・縮小，回転，平行移動などの 2 次元アフィン変換に対してはキャリブレーションパターンを電子透かしの不可視に埋め込むこと等で対応をしている．しかしながら印刷物をカメラで撮影する際に生じる平面射影変換に対応する手法はなかった．

また，動画を対象としたロバスト電子透かしにおいては，映画のスクリーンやテレビ画面をカメラで再撮影するなど，アナログ出力された動画からでも電子透かし検出が可能となる手法が提案されている [17, 18, 19]．しかしこれらは検出の際に原コンテンツ情報が必要であったり [19]，検出に必要な動画シーケンス長が数分程度必要であるなど [17, 18]，要件 (1.4), (1.5) を充足することが困難である．

さらに，静止画，動画いずれの手法も，PC など計算リソースが潤沢な環境での動作を前提としており，2 次元フーリエ変換やウェーブレット変換などの計算量の多い処理を伴うため，携帯電話機上での高速な検出処理が困難である．このため，要件 (1.4) の充足が困難であるという問題がある．

そして，要件 (1.6) については，従来スペクトラム拡散に基づく電子透かし手法では，透かし情報を擬似乱数列に一对一にマッピングして変調を行う直交符号化を行った場合について，False positive についての議論はなされていた [4, 6]．しかしながら，直交符号化を用いた場合には，検出時にあり得るすべての透かし情報に対応する擬似乱数列と，入力された画像信号との相関計算を行う必要があるため，高速処理が困難であった．

また，検出時に原コンテンツ情報などの事前情報を利用せずに Message error を定量的に評価する方法として，ビット毎の相関値の分布推定によってビット誤り率を推定する手法が提案されている [20]．この手法では，ビット毎の拡散率を十分に大きくとること，また，埋め込みビット長が十分長くすることが推定のために必要であるため， 2000×2000 画素といったサイズの大きな画像を用いている．しかしカメラ付き携帯電話機の撮影解像度，および高速検出処理の観点から，本研

究ではこのような大きな検出対象画像サイズを前提することができず、上記の推定のための条件を満たすことができないため、この推定手法をそのまま利用することができない。

以上をまとめると、PC等での処理を前提として、アナログ出力耐性を有する静止画及び動画向けのロバスト電子透かし技術は存在していたが、カメラ付き携帯端末に適用する際に問題となる同期はずれなどへの対応が不十分であり、かつ携帯電話機上での高速処理を可能とするアルゴリズムが存在しなかった。また、原コンテンツ情報を参照しない場合の検出信頼性保証については、検出処理量の多い直交符号化を用いたスペクトラム拡散ベースの手法においては False positive 評価が定量的に検討されてきたが、高速検出処理に向くビット毎直接拡散手法における False positive 評価、およびカメラ付き携帯電話機での処理を考慮した Message error の定量化についてはなされていなかった。

1.6 本研究の目的

本研究は、1.1 節で述べたコンテンツとメタデータの双方向のバインディングをアナログドメインにおいても保証するために、1.2 節で述べた画像及び映像を対象としたロバスト電子透かし技術について検討を行い、具体的な手法の提案及び評価を通じてその特徴及び有効性を明らかにすることを目的とする。

具体的な研究対象としては、1.3 節で示したカメラ付き携帯端末を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得アプリケーションシステムを設定する。そして、1.4 節で挙げた要件を本研究の範囲で充足するためには、1.5 節で述べたように従来技術では困難である。

そこで、本研究では、カメラ付き携帯端末を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得アプリケーション実現のために、画像及び動画を対象とし、1.4 節の要件を満足しうる新たな電子透かし方式の確立を図る。特に、本研究の範囲において特有の問題である、

- 原コンテンツ情報なしでも十分なアナログ耐性を有すること。特にカメラ付き携帯電話機による撮影で十分な検出能力を実現すること
- カメラ入力を行ってから短時間で検出結果を得ることが可能であること。特に携帯電話機上で高速処理を実現すること
- キャプチャ画像情報など、検出時に入手可能な情報のみから、検出結果の信頼性を評価でき、電子透かし検出信頼性の定量的保証を可能とすること。特に False positive 及び Message error の定量的保証を実現すること

の全てを同時に満足するという、困難な課題の解決を目的とする。

1.7 本論文の構成と概要

次章以降の本論文の構成とその概要について以下に示す。

2章 関連する技術及び研究

本研究に関連する技術及び研究について、電子透かし以外のアプローチとの比較を行って電子透かしアプローチの特徴を示す。また、従来の電子透かし技術について調査を行い、本研究で取り扱う技術的課題についてより詳細かつ具体的な整理を行う。

3章 アナログ出力耐性を有する静止画電子透かし技術と C/S システム

カメラ付き携帯端末を用いたアナログ画像からの関連情報取得システム実現への予備検討として、PC での動作を前提としたアナログ出力耐性を有する静止画電子透かし手法を用いたクライアント／サーバ方式について検討を行う。まず、アナログ出力耐性を有する電子透かし手法として、画像の空間周波数成分に対して直交符号化された透かし情報を重畳する静止画向け電子透かし手法を示す。提案手法では画像の空間周波数成分（フーリエ係数）の実部と虚部を独立したチャネルとみなして埋め込みを行うことによって、従来手法であるフーリエ係数の振幅に埋め込みを行う手法に対して拡散率を倍増させることが可能であり、それにより高いノイズ・圧縮耐性を実現する。また、False Positive について定量化を行う。評価実験により、印刷出力されたアナログ画像からでも電子透かしの検出が可能であることを確認する。最後に、提案手法を利用した C/S システムについて検討を行う。

4章 カメラ付携帯端末向けの高速な静止画電子透かし技術

第3章で示した C/S 方式における通信処理に伴うコスト問題を本質的に解決するため、カメラ付き携帯端末においてスタンドアロン処理で高速に検出処理が可能な静止画電子透かし方式について示す。提案方式は画像の縁を利用して撮影角度によって生じる幾何歪みの補正をすることで空間同期をとり、さらに安定した特性を有する2次元ブロックパターン変調を用いることにより微小な幾何歪みに対処し、スペクトラム拡散変調によりノイズに対するロバスト性を実現する。さらに、実サービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性（False Positive および Message Error）の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験によって、提案手法は携帯電話機上

の Java アプリケーションとして実装した場合でも 700 msec. 程度で電子透かし検出処理を完了することができ、また、十分なロバスト性を有することを確認できた。

5章 カメラ付携帯端末向けの高速な動画電子透かし技術：フレーム間差分法

対象メディアを動画へと変え、ディスプレイ上で再生されている動画をカメラ付き携帯端末でビデオキャプチャしながらリアルタイムに検出処理可能な、高速な動画向け電子透かし方式について示す。提案方式は、第4章の方式と同じくキャプチャフレーム中の矩形領域をリアルタイムに検出・追跡することでフリーハンド撮影によって刻々と撮影角度による幾何歪みに対処して空間同期を実現する。電子透かし検出は、連続してキャプチャされるビデオフレームの時間差分を取ることで原画成分を抑圧しS/N比を改善することにより、スペクトラム拡散された電子透かし信号をロバストに検出することが可能である。さらに第4章と同じく、検出透かし情報の信頼性（False Positive および Message Error）の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験により、画面表示された動画にカメラ付き携帯電話機をかざしてリアルタイムにかつロバストに検出可能であることを確認できた。

6章 カメラ付携帯端末向けの高速な動画電子透かし技術：SFPSS 法

第5章で示した方式の問題であった端末性能依存性を解消しつつ、さらなる耐性向上を実現するリアルタイム検出処理可能な高速な動画向け電子透かし方式について示す。提案方式では、空間同期については第5章の方式と同じく高速矩形検出・追跡手法によって実現される。電子透かし手法としては、時間同期不要であり高いロバスト性を有する単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法) を示し、さらに画素信号領域を対象とするように改良して高速化を図る。さらに第4,5章と同じく、検出透かし情報の信頼性（False Positive および Message Error）の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験により、提案手法は第5章の方式で問題であった端末性能依存性を解消すると同時に、ロバスト性の大幅な向上を実現することを確認できた。これにより電子透かしを用いたサービスの幅広い展開を実現可能となる。

7章 結論

最後に本論文で述べた研究成果をまとめる。

第2章 関連する技術及び研究

2.1 電子透かし以外のアプローチ

コンテンツ流通過程において、特に、アナログドメインにコンテンツが流通してもメタデータバインド保証するための技術として、本研究ではロバスト電子透かしアプローチを検討する。本節では、カメラ付き携帯電話機を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得というアプリケーションシステムにおいて、ロバスト電子透かしと同等の機能を実現し得ると考えられるいくつかの別の技術的アプローチとの比較を通じて、ロバスト電子透かしアプローチの特徴を明らかにする。

2.1.1 バーコード・2次元コード等利用

まず、バーコードや2次元コードなど、メタデータ自体を画像パターン化してコンテンツの傍ら等に表示し、これを携帯電話機のカメラで読み取って利用する方法が考えられる [21, 22, 23, 24, 25]。この方法は情報量の面で電子透かしアプローチより優れる (例えば、一般的にロバスト電子透かしの透かし情報量は数バイト～数十バイト程度であるが、QRコードでは100バイト以上の情報を表現することが可能である [25])。しかし、本研究のスコップとするアナログコンテンツからの関連情報取得システムでは、ネットワークを通じて関連情報を取得するため、この関連情報要求の際に検出したコンテンツIDを送信して受信側のサーバでコンテンツIDに対応する関連情報を提供する、いわゆるレゾリューション方式との親和性が高く、これを採用することによって少ない情報量であってもそれほど問題がないと言える。

また、コンテンツの傍ら、あるいはコンテンツ中に画像パターンを表示する必要があり、美観を損ねたり表示スペースを必要とする等の問題がある [26, 27]。宮奥ら [25] はデザインの自由度の向上を図るため、円環などの単純閉曲線上にカラーパターンを並べた情報表現形式 C-BAND を提案しているが、従来のバーコードよりは改善されたとはいえ表示スペースを必要とする点で同様の問題がある。電子透かしアプローチではコンテンツとメタデータが物理的に一体化しているため、美観、デザインの自由度、表示スペースの面での問題がない。

さらに、バーコードと画像の対応付けを気にすることなくコンテンツ自体を撮影することによりメタデータを取得できるため、直観的操作を実現可能であるという点で電子透かしアプローチは優れていると言える。また、バーコードがコンテンツの傍らに表示されている場合には、バーコードの読み取りのためにカメラを近づけるかズームをする必要がある。これに対し、電子透かしアプローチの場合にはコンテンツ全体に不可視に情報が埋め込まれているため、バーコードアプローチと比べて対象に近づいたりズームする必要性が低く、特に遠方の看板やスクリーンからのメタデータ取得がより容易になると考えられる。

2.1.2 位置情報・時間情報等利用

位置情報や時間情報から、対象とするコンテンツを識別し、関連情報を提供する方法が考えられる [28, 29]。これは例えば街頭の特定の看板や、テレビ放送の特定の番組など、位置や時間でコンテンツを特定することが可能な場合に適用可能である。しかし、逆に言えば、雑誌の広告写真のようにどこで利用されるか分からない場合や、DVD (Digital Versatile Disc) 等の蓄積メディア、PVR (Personal Video Recorder) などに録画されたTV番組のタイムシフト再生、あるいはネット配信コンテンツのようにいつ再生されるか分からない場合には適用できない。これに対して電子透かしアプローチはコンテンツをメタデータと一体化するため、位置、時間に関わらず、常にコンテンツにバインドされているメタデータを取得することが可能である。

2.1.3 別通信チャネル利用

印刷物に無線タグを貼付することによりコンテンツを識別する [30]、あるいはデジタル放送等においてデータチャネルを用いることによってメタデータとコンテンツを同時に配信する [31] 等、別の通信チャネルによってコンテンツとメタデータとのバインディングを保証する方法も考えられる。しかしこれらは、携帯電話機にRFID読み取り機能やデータ放送受信機など新たなハードウェアを追加する必要があること、別通信チャネルを利用することによるコスト高など、既存の環境との親和性などに問題があると言える。特にワンセグ放送などのデジタル放送のデータチャネルを用いて、放送番組の関連情報をチューナで受信する方法 [31] は、データチャネルを持つデジタル放送に対象が限定され、従来のアナログ放送、DVDなどの蓄積メディア、屋外の公共ディスプレイ上の再生映像に関する関連情報を取得することが不可能である。また、赤外線や可視光通信を用いたアプロー

チも提案されているが [32, 33], 発信側および受信側に新規なハードウェア機能追加等が必要であり, やはりコストが高いと言える。

これに対して電子透かしアプローチでは, 画像や映像コンテンツ信号自体にメタデータを不可視に埋め込むことにより, 既存の印刷あるいは映像再生環境に手を加える必要がないため既存の環境との親和性が高く, 低コストにサービス提供を行うことが可能である。

2.1.4 コンテンツマッチング利用

撮影したコンテンツの特徴量等を求め, 事前にコンテンツ (の特徴量) が登録されているデータベースに問い合わせてコンテンツを識別し, メタデータを取得するという方法も考えられる [34, 35, 36]. この方法は, 電子透かしとは異なり事前のコンテンツ処理が必要ないこと, 及びコンテンツに手を加える必要がないという点で電子透かしアプローチより優れているといえる。

しかし, 特徴量算出処理量, データベースへの送信データ量, サーバ側で保持すべき特徴量 DB のレコード数などの点で携帯電話向け適用には困難さがあると考えられる。この点について, 例えば阿部ら [36] は, 携帯電話機内で特徴量算出を高速処理可能なアルゴリズムを提案し, 静止画一枚当たりの特徴量も 512 ビット程度と比較的少なくすることを可能にしてデータベースへの送信データ量も低減し, さらにデータベース上に登録される特徴量データ量も低減可能とした。

しかし, 特にコンテンツマッチングにおいては誤識別の問題があり, 商用利用など正確さが求められる応用の際に問題となると考えられる。特にアナログ出力コンテンツをカメラ付き携帯電話機で撮影して得られたキャプチャ画像とのマッチングは極めて難しい問題であり, 低い誤識別率と高い正識別率の両立が困難である [34]. そのため登録可能な画像数を制限するなどの対応が必要となることが多い。これに対して提案する電子透かしアプローチでは, 後述するように検出結果の信頼性を定量的に保証することが可能であり, 誤識別率を低く抑えることが可能である。またその条件下で, コンテンツ ID を表す透かし情報は, その情報長で表現できるすべての値の組み合わせについて一意に特定することができるため, 識別可能なコンテンツ数も多く取れる。

また, 端末側で得られた特徴量から関連情報が得られるか否かはリモートのデータベース側でマッチングした結果が得られなければ分からないため, 撮影時にピンボケや手ぶれなどが生じたために正しく特徴量を得られない場合でも, 必ずサーバに要求を送らなくてはならず利便性の面で難がある。後述するとおり本研究では, 携帯端末上で高速に検出処理可能な電子透かし方式を検討することにより, 不

必要な通信を伴わずに検出可否を素早く判別できるようにする。

さらに、同一の絵柄のコンテンツから得られる特徴量は一つのみであるから、同一のコンテンツに対応付け可能な関連情報は一通りのみである。例えば同一のコンテンツに対応付ける関連情報を、TV 放送用と DVD 用などメディアの違いを区別して異なるようにすることができない。これは、例えば、同一の画像を広告として利用して、新聞、テレビ、雑誌、ポスター、インターネットなど様々なメディアで告知を行い、利用者がそれらのうちのいずれかをきっかけにしてコンテンツ関連情報にたどり着いた際に、きっかけを与えたメディアを特定してそのメディアに成功報酬として広告料を支払う、いわゆる pay-per-click 型の広告ビジネス [11, 12] への展開が不可能など、適用範囲が狭くなるという問題がある。これに対して電子透かしアプローチでは画像に対して埋め込む透かし情報は独立であるから、同一画像に異なるコンテンツ ID を埋め込むことが可能であり、同一の画像をコンテンツ ID を用いて個体化可能である。

以上に述べた関連する技術と、電子透かしアプローチとの比較結果を表 2.1 にまとめる。後述する、アナログ耐性、高速検出処理、検出結果の信頼性保証を実現することによって、関連する他アプローチに対して優位性を持ち得ることが分かる。

表 2.1: 電子透かしアプローチと関連技術との比較

| | 美観/デザイン柔軟性 | 読取/識別信頼性 | 識別可能情報量 | コンテンツ個体化 | 読取/識別処理時間 | 実現のためのコスト |
|----------------|-------------|-------------|---------|--------------|-------------|-----------------|
| バーコード・2次元コード | × | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 位置情報・時間情報 | ○ | ○ | △ | × | ○ | ○ |
| 別通信チャンネル | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | × |
| コンテンツマッチング | ○ | × | △ | × | △ | △ |
| 提案する電子透かしアプローチ | ○ 不可視埋込可 | ○ 定量的保証可 | △ ※ | ○ 独立情報埋込可 | ○ 高速な新方式 | ○ 既存環境との親和性高 |

※レゾリューション方式 (ID → メタデータ変換) により情報量の少なさはカバー可能

2.2 従来の電子透かし技術

2.2.1 電子透かしの定義と本研究の対象

「電子透かし技術」[6, 39] は、コンテンツの中に別の情報を知覚できないように埋め込む（隠す）技術、という広い意味で用いられることが多いが、この最も広い概念

を「情報ハイディング」と呼び、これを大きくステガノグラフィ (Steganography) と電子透かしに分類する考え方もある (表 2.2)[84].

ステガノグラフィは埋め込まれる情報に主眼が置かれ、これを隠蔽することが目的であり、例えば、写真データのやり取りに偽装して秘密のメッセージ通信を行うような場合に利用する.

それに対し、電子透かし技術はコンテンツに関連した情報を埋め込む. さらに電子透かし技術は、「強い (ロバスト, Robust)」電子透かしと「弱い (フラジャイル, Fragile)」電子透かしに分けられる.

ロバスト電子透かしは、コンテンツに JPEG・MPEG などの非可逆圧縮や編集・加工を施しても、透かし情報の検出が可能な高い耐性を持つものである [38]. 埋め込まれた情報は、コンテンツの編集・加工により傷ついてしまうが、例えば、誤り訂正符号などで冗長化することで、ロバストにすることが可能である.

フラジャイル電子透かしは、コンテンツの変更に対して、電子透かしが壊れやすく敏感に応答する特徴を持ち、コンテンツ改ざん検知の目的で利用される [40]. 先に述べたように、埋め込まれた情報は、コンテンツの編集・加工により傷つくので、この傷に敏感に応答するようにして技術を構成する.

表 2.2: 電子透かし (情報ハイディング) 技術の大分類

| | | | |
|----------|----------|--------------------|---|
| 情報ハイディング | ステガノグラフィ | | <ul style="list-style-type: none"> ・ 応用: 通信秘匿等 ・ 要件: 埋め込み情報量, 秘匿性 |
| | 電子透かし | 強い (Robust) 電子透かし | <ul style="list-style-type: none"> ・ 応用: 著作権管理, 情報誘導等 ・ 要件: 編集耐性, 攻撃耐性等 |
| | | 弱い (Fragile) 電子透かし | <ul style="list-style-type: none"> ・ 応用: コンテンツ改ざん検知等 ・ 要件: 改ざん検知能力等 |

その他にもさまざまな観点から電子透かしを分類することができる. まず、電子透かしの検出の際に透かしを埋め込む前のオリジナルコンテンツを参照するか否かで分類することが可能である. 著作者のように、オリジナルコンテンツを所有する側が透かしの検出を行う場合は、オリジナルコンテンツを利用する電子透かし技術を用いることが可能であるが、コンテンツの利用者 (または第三者) 等が透かしを検出する場合には、オリジナルコンテンツを要しない電子透かし技術が必要となる. 一般にオリジナルコンテンツを参照することが可能な電子透かし技術の方がロバスト性など性能を高くすることが容易であるため、オリジナルコンテンツを参照しない電子透かし技術で高いロバスト性を実現することはより困難な課題である.

また、電子透かし技術の多くでは、透かしを埋め込むことによりコンテンツデータの一部分が欠損するため、透かしデータを取り除いてオリジナルコンテンツを完

全に復元することができない（非可逆な透かし）。しかし、医療画像などコンテンツの劣化が許されないような応用のために、透かしデータを完全に取り除いてオリジナルコンテンツを復元可能な、可逆電子透かし技術も提案されている[41]

本研究においては、アナログ出力された画像・動画をカメラ付き携帯電話機で撮影し、キャプチャ画像から電子透かしの検出を行うため、上記の分類における、ロバスト電子透かしについて特に検討を行う。また、検出時にはオリジナルコンテンツを参照しない方法を検討する。電子透かしの可逆性については、アナログ出力の時点でデジタルデータとしてのオリジナルコンテンツは既に劣化しているため、特に考慮をしないものとする。

2.2.2 静止画電子透かし技術

デジタル静止画向けロバスト電子透かし技術

ロバストな静止画電子透かし技術の研究開発は、デジタル画像の著作権保護等のため、主に JPEG 等の非可逆圧縮耐性を考慮した手法が多く提案されてきた[38, 42, 43, 44, 45, 46, 47]。デジタル画像の非可逆圧縮や編集加工のみに注目したこれら方法では、アナログ出力耐性を実現できないものも多い。例えば画像をブロック分割し、ブロックの直交変換係数値を量子化し、量子化値の偶奇にビット値を割り付ける手法[44, 45]について考えると、アナログ出力によって生じる幾何歪みのために、ブロックの切り出し位置が変わってしまう同期はずれや、あるいはアナログ出力および再デジタル化の際の画像のコントラストなどのトーンカーブがリニアに保存されないことによる直交変換係数のダイナミックレンジの変化などにより、電子透かし検出時の直交変換係数を量子化しても埋め込んだビット値を正しく検出することができない。

アナログ出力に伴うノイズ耐性を有する静止画電子透かし技術

これに対して、アナログ出力耐性を考慮したロバスト電子透かし技術も提案されている。最初期のものとして、Cox らによる画像の離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform, DCT) 係数上へのスペクトラム拡散された透かし信号の重畳手法がある[4]。この手法では透かし情報を擬似乱数列を用いて直交符号化（透かし情報の取り得る値一つ一つに対して、異なる擬似乱数列にマッピングすること[48]）することでスペクトラム拡散変調する。そして拡散された透かし情報を画像の複数の DCT 係数値に重畳する。検出の際には、検出対象画像と原画像との差分を取り、差分信号の DCT 係数と擬似乱数列との相関値を求め、大きな相関値をとる擬

似乱数列の表す情報を検出した透かし情報とするものである。相関値に基づく検出であるため、上記の量子化手法と異なりコントラストのダイナミックレンジの変化等に対してロバストであり、印刷した画像を再スキャンしたものからの検出が可能であることが示されている。ただし当初の手法は検出の際に原画像を参照する必要があった。

しかし Cox らの手法は、ほぼそのまま原画像を参照しない検出に転用することができるものであった。Piva らは Cox らの手法をベースに、原画像を参照しないスペクトラム拡散変調ベースの電子透かし手法を提案した [49]。これは、スペクトラム拡散変調の立場から見ると、原画像信号は非常に大きなノイズであるが、ノイズ耐性に優れるスペクトラム拡散変調を用いることで、そのような劣悪な通信路においても透かし信号を正しく復調できることを利用したものである。上記の Cox らの手法は、通信路上の主要なノイズの分布（＝原画像信号）が既知であるためノイズキャンセルすることで利得を大幅に向上したケースと考えることができる。これらの研究により、ロバスト電子透かしの実現にノイズ耐性に優れるスペクトラム拡散変調の利用が非常に有用であることが明らかになった。

同期はずれ耐性を有する静止画電子透かし技術

また、印刷などのアナログ出力及びスキャンなどによる再デジタル化に伴う、画像の拡大・縮小、回転、平行移動などの2次元アフィン変換に対する耐性、すなわち空間同期の実現も電子透かし技術の大きな研究課題の一つであった [50, 51]。O'Ruanaidh らは、Fourier-Mellin 変換を利用した不変量アプローチ [52] や、Piva らの手法と類似した手法として、画像をブロックに分割し、ブロックの離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform, DFT) 係数の振幅に対して、直交符号化された透かし情報を重畳すると同時に、いくつかの変換係数の振幅を非常に大きくして、これを不可視なキャリブレーションパターンとして透かし情報と共に画像に埋め込む手法を提案した [16, 53]。画像の画素信号領域での2次元アフィン変換と、それに対応する周波数領域での DFT 係数値の変化との対応関係（画像の回転は周波数領域の回転、画像の拡大/縮小は周波数領域での縮小/拡大、画像の平行移動（正確には循環シフト）に対して DFT 係数の振幅値は不変）を利用することで、電子透かし検出の際に上記の不可視キャリブレーションパターンを探索して、画像に加えられた幾何変換パラメータを推定することが可能である。推定した変換パラメータを利用して幾何補正を行って電子透かしを検出することで、変形が加えられても電子透かしを正しく検出することができる。

ロバストな静止画電子透かし技術を用いた画像からのメタデータ取得システム

ロバストな静止画電子透かしは、先に述べたとおりデジタル画像流通における著作権管理・保護などを念頭においたものが多い[8, 42, 43]。これらの多くでは、画像の中に著作者情報や著作権管理情報、コピー制御情報などを埋め込み、専用の電子透かし検出ツールで画像中の上記の情報を読み取って利用する。また、ロバスト電子透かしによって埋め込み可能な透かし情報長はそれほど多くないため、上記の情報そのものではなく、それらのID情報のみを埋め込み、検出時には読み取ったID情報をキーにしてID-メタデータ対応データベースに問い合わせることで詳細なメタデータを取得するという方法が多い[7, 8, 54]。第1章で紹介したcIDfの著作権管理システムは、コンテンツに対して固有のIDである著作物IDと、その流通経路を特定する流通IDとを組にしたものを”コンテンツID”とし、これをコンテンツの中に埋め込むことによって、コンテンツの個体化を実現している[8]。

一方、アナログ出力耐性を有する静止画電子透かし技術を用いたメタデータ取得システムとしては、入江らによるネットワークコピーマネージャ[10]がある。これはコピー機に電子透かし検出機能を追加し、コピーの際にスキャン画像から電子透かしとして埋め込まれたコンテンツIDを検出し、このコンテンツIDを利用して、印刷物からデジタル原本データを取り寄せたり、白黒印刷物をコピーすることでカラー印刷物を出力させたり、あるいはコピーの世代管理を行うなど、高付加価値なコピー機能を提供するものである。また、PCに接続したWebカメラなどを印刷された透かし入り画像にかざして電子透かしをリアルタイムに検出し、印刷物に関連するWebサイト等に誘導する技術も提案されている[11, 13]。これらの手法は印刷媒体による広告とインターネット上のサービスを結びつけるクロスメディア広告の一つの実現形態であると言える。

2.2.3 動画電子透かし技術

デジタル動画向けロバスト電子透かし技術

ロバストな動画電子透かし技術の研究開発についても、デジタル動画の著作権保護等のため、主にMPEG等の非可逆圧縮耐性を考慮した手法が多く提案されてきた[55, 56, 57, 58]。動画の著作権管理・保護については、静止画のように印刷してアナログ出力されてそれが流通することはあまり想定されず、デジタルデータの流通を考慮することが特に重要であるとの観点から、デジタル動画に対する編集加工と非可逆圧縮に対する耐性に主に焦点が当てられていた。静止画と同じく動画像の各フレーム画像の2次元直交変換係数の量子化に基づく手法[58]など、動

画を静止画の連なりとみなして各フレームに静止画電子透かし手法を適用するものがあるが、動画の時間軸方向を活用するため、一連のフレーム画像群に対して3次元直交変換を施して得られる時空間周波数成分を利用する手法[60, 61]など、動画特有のアプローチをとるものが多い。量子化に基づく手法は、静止画と同様にアナログ出力に伴うコントラスト変化に対する耐性を有していない。

動画の時間軸方向を活用する手法では、各フレームに対して異なる方法で電子透かしを埋め込むこととなるため、埋め込み時の処理タイミングと検出時の処理タイミングが異なることによる時間シフト耐性を考慮する必要がある。時間シフト耐性の実現手法としては、時間シフトのための同期信号を埋め込む[63]、あるいは電子透かしの読み取りが成功するまで順次検出処理を開始するフレームをずらしながら探索するなど[59]、網羅的探索手法を用いるものが提案されている。また、時間シフト不変量である時空間周波数成分の振幅値に対して電子透かし埋め込みを行うことで、効率的に時間シフト耐性を実現しようとする手法も提案されている[60, 62]。

さらに、デジタル動画を対象としているため、画像の幾何変換に関しては4:3動画を16:9動画に変換するといった、アスペクト比変更を主なスコープとしており[64]、これは入力動画信号のフレームサイズに対して相対座標系を用いて埋め込み、検出を行うことで対応可能であることから、それほど困難な問題とは考えられていない。

アナログ出力耐性を有する動画電子透かし手法

静止画と同じく、時空間周波数成分の振幅値に対してスペクトラム拡散された透かし情報を重畳する手法が提案されており[60]、スペクトラム拡散をベースにしている点で潜在的にアナログ出力に伴うノイズ耐性を有するものであると考えられる。

また、デジタル動画の再生をVHS等のアナログビデオとしてコピーすることを考慮した、アナログ出力耐性を有する手法も提案されている[65]。この手法では、透かし情報を空間方向および時間方向にスペクトラム拡散して動画の画素信号領域に重畳し、検出の際には時間シフトについて網羅的に探索して電子透かしの検出を行う。

アナログ出力動画の再撮影に耐性を有する動画電子透かし手法

デジタルビデオカメラの小型化、高画質化、および映画のデジタル化による高画質化等に伴い、映画館のスクリーン上に投射されている映画映像を盗撮するこ

とによる海賊版の不正流通が映画業界を中心に問題となってきた[19]。これに対応するため、再撮影耐性を有する動画電子透かし技術の研究開発が盛んになってきている。Lubinらの手法[19]は、動画内の視覚的に目立ちにくい成分を分析して特定し、その部分を時空間的に低周波で極僅かに変化させる。検出時には原コンテンツを参照する必要がある。Haitsmaらの手法[18]は画面全体の平均輝度をスペクトラム拡散された透かし情報に基づいて極僅かに変動させる。検出時にはカメラで撮影された画面領域が一定以上のサイズであれば、撮影角度などに伴う同期はずれを無視できる点で優れているが、検出のためには数分程度の動画シーケンスが必要である。山下らの手法[66]では幾何歪み補正のための不可視なキャリブレーションパターンを透かし情報と共に埋め込んでいるが、不可視キャリブレーションパターンの検出のためにはカメラが三脚等により固定されている必要がある。また、中村の手法[17]では動画に時空間低周波の関数を重畳し、相関計算に基づいて電子透かしを検出するものであるが、撮影角度に伴う空間同期はずれには対応しておらず、また、検出に必要な動画シーケンス数も数十秒～数分程度と比較的長い。

2.2.4 電子透かし検出の信頼性

電子透かし技術の実運用の際には、検出結果の信頼性評価がきわめて重要である。表 2.3 に電子透かし検出において生じうる検出ステータスをまとめる。

表 2.3: 電子透かし検出ステータスの分類

| 検出対象 | 検出結果 | | 検出ステータス |
|----------------|------------|----------|-----------------------------------|
| 透かし埋め込み無しコンテンツ | 「透かし無し」と判定 | | True Negative |
| | 「透かし有り」と判定 | | False Positive |
| 透かし埋め込み有りコンテンツ | 「透かし有り」と判定 | 正しい情報を検出 | Correct Detection (True Positive) |
| | | 誤った情報を検出 | Message Error |
| | 「透かし無し」と判定 | | False Negative |

この中で、特にクリティカルなエラーとしては、

False Positive:

電子透かしが埋め込まれていないコンテンツからの検出であるにもかかわらず、何らかの情報を「正しく検出した」と判定してしまうエラー

Message Error:

電子透かしが埋め込まれているコンテンツからの検出の際に、埋め込まれて

いる透かし情報とは異なる情報を「正しく検出した」と判定してしまうエラーの二つが挙げられる（もう一つのエラーである False Negative は、電子透かし技術の中では一般にロバスト性として議論される）。

直交符号化（あるいは Random Watermark と呼ぶこともある）を用いたスペクトラム拡散ベースの電子透かし技術 [4, 49, 16] においては、原コンテンツ情報を参照することなく、相関値に対する統計的議論により False Positive を定量的に評価することが可能である [6]。しかしながら Message Error の定量評価については、透かし信号強度や原コンテンツ情報、付加されたノイズ強度などの情報が必要である [6]。

また、直交符号化手法に比べて高速処理が可能なビット毎の直接拡散手法においては、埋め込むビット値によって相関値の極性（正負の符号）が異なるため、基本的に各ビット毎の相関値に基づいて False Positive を評価する [6] が、統計的分析のため、各ビット毎の拡散率（1 ビットの情報をどれだけの長さの乱数列で表現するか）を大きくとる必要がある。また、検出時に原コンテンツ情報などの事前情報を利用せずに Message error を定量的に評価する方法として、ビット毎の相関値の分布推定によってビット誤り率を推定する手法が提案されている [20]。この手法では、ビット毎の拡散率を十分に大きくとること、また、埋め込みビット長が十分長くすることが推定のために必要であるため、 2000×2000 画素といったサイズの大きな画像を用いている。しかしカメラ付き携帯電話機の撮影解像度、および高速検出処理の観点から、本研究ではこのような大きな検出対象画像サイズを前提することができず、上記の推定のための条件を満たすことができないため、この推定手法をそのまま利用することができない。

2.2.5 従来の研究の問題点

以上で述べた従来の電子透かし技術について、本研究のスコープであるカメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの関連情報取得システム実現のための要件と照らし合わせながら、その課題について述べる。1.5 節で示した要件を以下に再掲する。

(1.1) 【不可知性】

電子透かし埋め込みによるコンテンツ品質劣化を低く抑え、知覚困難とすること

(1.2) 【ロバスト性】

想定されるコンテンツ処理が施されても電子透かしの検出を可能とすること

【アナログ変換耐性】

透かし入りデジタル画像の、印刷・画面表示などのアナログ出力による劣化、カメラによる再撮影時のアナログノイズ、再デジタル化に伴う劣化等に対する耐性が必要となる

【撮影条件による同期はずれ耐性】

アナログ画像をカメラで撮影する際の撮影角度による幾何歪みや、印刷物表面の微妙なゆがみ等による空間同期はずれに対する耐性、また、対象が動画コンテンツである場合は、埋め込み開始タイミングと撮影タイミングのずれによる時間同期はずれに対する耐性も必用となる

(1.3) 【埋め込み情報量】

想定されるアプリケーションに十分な情報量を埋め込み可能とすること

(1.4) 【原コンテンツ非参照】

原コンテンツを参照しないで電子透かし検出を行うこと

(1.5) 【応答時間】

カメラ入力を行ってから電子透かし検出が終了するまでの所要時間が短いこと。また、検出可否についても素早く判別できること

(1.6) 【電子透かし検出の信頼性保証】

原コンテンツ情報や埋め込まれている透かし情報、埋め込み強度やノイズ強度などの事前情報を用いず、検出時に取得可能な情報のみ用いて、電子透かし検出結果の信頼性を定量的に評価、保証することが可能であること

まず、要件(1.1)～(1.3)は互いにトレードオフの関係にあるため、(1.2)ロバスト性に着目して考えることとする。ロバスト性について、原コンテンツ情報を参照しないで検出を行う従来のロバスト電子透かしにおいては、静止画を印刷しそれをスキャナで再デジタル化しても検出可能な手法[16, 67, 68, 69]や、あるいはWebカメラなどで撮影した場合でも検出可能な手法[11, 13]などは存在する。これらはJPEG等の非可逆圧縮に対する耐性を強化することでアナログノイズ耐性を実現し、また、画像の拡大・縮小、回転、平行移動などの2次元アフィン変換に対してはキャリブレーションパターンを電子透かしの不可視に埋め込むこと等で対応をしている。しかしながら印刷物をカメラで撮影する際に生じる平面射影変換に対応する手法はなかった。例えば、中村ら[70]は画像全体の離散フーリエ変換面での透かし埋め込み手法において、平面射影変換などの非線形変換によって電子透かしの識別性が著しく損なわれることを述べている。

また、動画を対象としたロバスト電子透かしにおいては、映画のスクリーン等で再生されている動画をカメラで再撮影するなど、アナログ出力された動画からでも電子透かし検出が可能となる手法が提案されている[17, 18, 19, 66]。しかしこれらは検出の際に原コンテンツ情報が必要であったり[19]、検出に必要な動画シーケンス長が数分程度必要であるなど[17, 18]、要件(1.4),(1.5)を充足することが困難である。また、撮影角度によって生じる空間同期はずれについては、原コンテンツを参照することによる補正を前提としているか[19]、あるいはカメラが三脚等で固定されている状況を想定しており[66]、カメラ付き携帯電話機による撮影のようない、フリーハンド撮影を考慮していない。

さらに、静止画、動画いずれの手法も、PCなど計算リソースが潤沢な環境での動作を前提としており、2次元フーリエ変換やウェーブレット変換などの計算量の多い処理を伴うため、携帯電話機上での高速な検出処理が困難である。このため、要件(1.4)の充足が困難であるという問題がある。

そして、要件(1.6)については、従来スペクトラム拡散に基づく電子透かし手法では、透かし情報を擬似乱数列に一对一にマッピングして変調を行う直交符号化を行った場合について、False positiveについての議論はなされていた[6, 49]。しかしながら、直交符号化を用いた場合には、検出時にあり得るすべての透かし情報に対応する擬似乱数列と、入力された画像信号との相関計算を行う必要があるため、高速処理が困難であった。

また、検出時に原コンテンツ情報などの事前情報を利用せずに Message error を定量的に評価する方法として、ビット毎の相関値の分布推定によってビット誤り率を推定する手法が提案されている[20]。この手法では、ビット毎の拡散率を十分に大きくとること、また、埋め込みビット長を十分長くすることが推定のために必要であるため、 2000×2000 画素といったサイズの大きな画像を用いている。しかしカメラ付き携帯電話機の撮影解像度、および高速検出処理の観点から、本研究ではこのような大きな検出対象画像サイズを前提することができず、上記の推定のための条件を満たすことができないため、この推定手法をそのまま利用することができない。

以上をまとめると、PC等での処理を前提として、アナログ出力耐性を有する静止画及び動画向けのロバスト電子透かし技術は存在していたが、カメラ付き携帯電話機に適用する際に問題となる同期はずれなどへの対応が不十分であり、かつ携帯電話機上での高速処理を可能とするアルゴリズムが存在しなかった。また、原コンテンツ情報を参照しない場合の検出信頼性保証については、検出処理量の多い直交符号化を用いたスペクトラム拡散ベースの手法においては False positive 評

価が定量的に検討されてきたが、高速検出処理に向くビット毎直接拡散手法における False positive 評価、およびカメラ付き携帯電話機での処理を考慮した Message error の定量化についてはなされていなかった。

以上述べた従来の電子透かし技術の課題を鑑み、本研究では、カメラ付き携帯電話機を用いたアナログコンテンツからの関連情報取得アプリケーション実現のために、画像及び動画を対象とし、全ての要件を満足しうる電子透かし方式の確立を図る。特に、本研究のスコープにおいて特有の問題である、

- 原コンテンツ情報なしでも十分なアナログ耐性を有すること。特にカメラ付き携帯電話機による撮影で十分な検出能力を実現すること
- カメラ入力を行ってから短時間で検出結果を得ることが可能であること。特に携帯電話機上で高速処理を実現すること
- キャプチャ画像情報など、検出時に入手可能な情報のみから、検出結果の信頼性を評価でき、電子透かし検出信頼性の定量的保証を可能とすること。特に False positive 及び Message error の定量的保証を実現すること

の解決に注力する。

第3章 アナログ出力耐性を有する静止画電子透かし技術とC/Sシステム

本章では、カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの関連情報取得システム実現への予備検討として、PCでの動作を前提としたアナログ出力耐性を有する静止画電子透かし手法を用いたクライアント／サーバ方式について検討を行う。まず、アナログ出力耐性を有する電子透かし手法として、画像の空間周波数成分に対して直交符号化された透かし情報を重畳する静止画向け電子透かし手法を示す。本手法では画像の空間周波数成分（フーリエ係数）の実部と虚部を独立したチャンネルとみなして埋め込みを行うことによって、従来手法であるフーリエ係数の振幅に埋め込みを行う手法に対して拡散率を倍増させることが可能であり、それにより高いノイズ・圧縮耐性を実現する。また、False Positiveについて定量化を行う。評価実験により、印刷出力されたアナログ画像からでも電子透かしの検出が可能であることを確認する。最後に、本手法を利用したC/Sシステムについて検討を行う。

3.1 はじめに

画像に対するロバスト電子透かし技術においては、画像の幾何学的改変（アフィン変換、切り取りなど）に対する耐性と、非幾何学的改変（階調変換、非可逆圧縮など）の二つの改変に対する耐性が重要である。幾何学的改変耐性を有する手法と、非幾何学的改編耐性を有する手法を、お互いの欠点を補完するために組み合わせて用いる手法が提案されているが[71]、例えば非可逆圧縮の後に切り取りを行った場合などで、どちらの方法を用いても透かし情報が読みとれなくなる場合があり、本質的な解決にはなっていない。

透かし情報を埋め込んだ画像に幾何学的改変を施された場合でも、施された幾何学的改変が予め分かっているならば補正により透かし情報を検出可能であることが報告されており[46]、施された幾何学的改変に関する情報が得られれば、透かし情報の検出が可能になると考えられる。本章では、画像の周波数成分値（フーリエ係数）の実部と虚部を独立したチャンネルとみなして埋め込みを行うことによって、

従来手法であるフーリエ係数の振幅に埋め込みを行う手法[16]に対して拡散率を倍増させ、それにより高いノイズ・圧縮耐性を実現する。さらに埋め込んだ透かし情報を、画像の平行移動に伴う周波数成分値の位相差を考慮して読みとることにより、画像の平行移動や一部切りりに対する耐性を向上する方法について検討し、実験評価を行う。

3.2 周波数領域への透かし埋め込み

透かし埋め込み処理は、スペクトル拡散通信における直接拡散方式を基に周波数成分値を変更する。透かし埋め込み処理への入力は、原画像(多値画像)、鍵情報、埋め込み強度、透かし情報であり、出力は透かし入り画像である。以下処理フローを説明する。

step 1. $M \times M$ サイズの複素行列である透かし係数値行列 $W(u, v)$ ($0 \leq u, v < M$) を用意し、初期値は零行列とする。

step 2. 鍵情報から生成される疑似乱数列を用いて、整数値の組 (u_n, v_n, w_n) ($0 \leq n < N$) を重複なく選ぶ。ただし (u_n, v_n) は予め定められている埋め込み処理を行う中周波帯域の中にあるようにする。また $w_n = 0$ または 1 である。

step 3. 鍵情報 key を初期値とする疑似乱数列 $\{m_n\}$ を用いて、長さ N の拡散系列 $\{x_n\}$ を以下のようにして得る。

$$x_n \leftarrow a \cdot m_n \quad (0 \leq n < N)$$

ただし $a(> 1)$ は予め定められている実数パラメータである。

step 4. 透かし情報を L 進数に基数変換し、各桁の値(シンボル値)を S_k ($0 \leq k < K$) とする[16]。

$k = 0 \sim K - 1$ について

$$x_n \leftarrow x_n + m_{L \cdot k + S_k + n + 1} \quad (0 \leq n < N)$$

によって透かし情報を拡散する(図 3.1)。全ての $\{x_n\}$ を求めた後、平均値が 0 となるように値をシフトする。

step 5. $\{x_n\}$ と $\{(u_n, v_n, w_n)\}$ を用いて、透かし係数値行列 $W(u, v)$ の要素を変更する。

$n = 0 \sim N - 1$ について

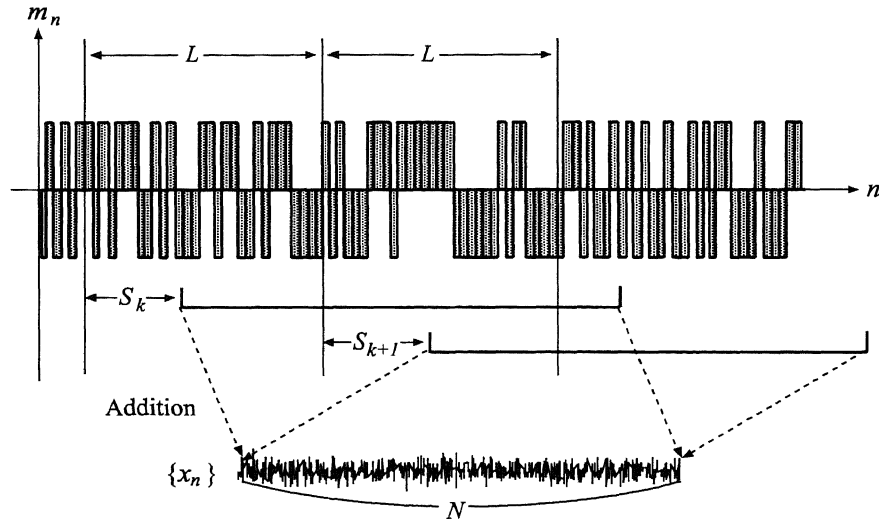


図 3.1: 透かし情報の拡散

- $w_n = 0$ のとき :

$$\text{Re}(W(u_n, v_n)) \leftarrow \text{Re}(W(u_n, v_n)) + x_n$$

$$\begin{aligned} &\text{Re}(W(M - u_n, M - v_n)) \\ &\leftarrow \text{Re}(W(M - u_n, M - v_n)) + x_n \end{aligned}$$

- $w_n = 1$ のとき :

$$\text{Im}(W(u_n, v_n)) \leftarrow \text{Im}(W(u_n, v_n)) + x_n$$

$$\begin{aligned} &\text{Im}(W(M - u_n, M - v_n)) \\ &\leftarrow \text{Im}(W(M - u_n, M - v_n)) - x_n \end{aligned}$$

$\text{Re}(\cdot)$ は実数成分を, $\text{Im}(\cdot)$ は虚数成分をそれぞれ表す. 二つの係数値を変更するのは, $W(u, v)$ を離散逆フーリエ変換した行列が実行列になるための条件:

$$W(u, v) = W^*(M - u, M - v)$$

を保つためである (*は複素共役を表す).

step 6. 透かし係数値行列 $W(u, v)$ を離散逆フーリエ変換し, 透かしパターン $P(i, j)$ ($0 \leq i, j < M$) を得る.

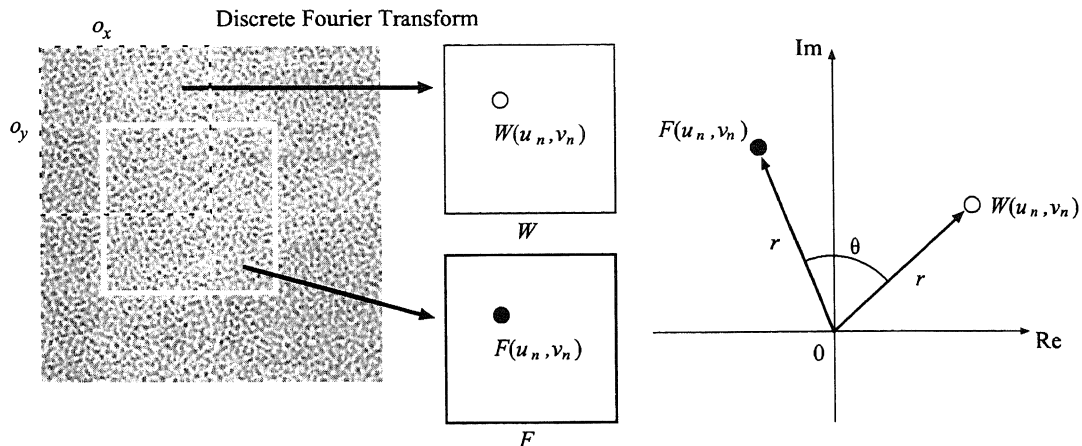


図 3.2: 平行移動による位相差

step 7. 透かしパターン $P(i, j)$ に埋め込み強度 $power$ を乗算し、これを原画像 $I(x, y)$ にタイル状に加算して透かし入り画像 $I'(x, y)$ を得る.

提案手法における透かし埋め込み処理では離散フーリエ変換によって得られる係数値の実数成分と虚数成分を、独立に変更可能な成分とみなし拡散系列を重畳している. また透かし入り画像に $M \times M$ 画素毎に繰り返される透かしパターンを重畳している.

3.3 平行移動による位相差を考慮した透かし検出

3.3.1 画像の平行移動によるフーリエ変換係数の位相差

3.2 節の透かしパターンのタイリングによってのみ構成されている画像について考える. 透かしパターンの開始座標から (o_x, o_y) だけオフセットした位置から $M \times M$ のブロック画像を切り出して離散フーリエ変換して得られる係数行列を $F(u, v)$ とする. 埋め込み処理によって変更された係数 $W(u_n, v_n)$ の次数と同じ次数の係数 $F(u_n, v_n)$ に注目すると, フーリエ変換の平行移動に関する性質から

$$F(u_n, v_n) = W(u_n, v_n) \cdot e^{-2\pi i \frac{u_n \cdot o_x + v_n \cdot o_y}{M}} \quad (3.1)$$

となり, 係数の次数とオフセットに応じた位相差が生じている状態になる (図 3.2).

透かしパターンが原画像に加算されて透かし入り画像となっている場合, $F(u_n, v_n)$ は原画像の対応する成分によって大きく異なる値をとるが (図 3.3), この原画像の影響を信号 (= 透かし情報) に重畳された非常に大きな雑音とみなすと, スペクトル拡散通信のような雑音に強い変調方法を用いれば信号を検出することができる.

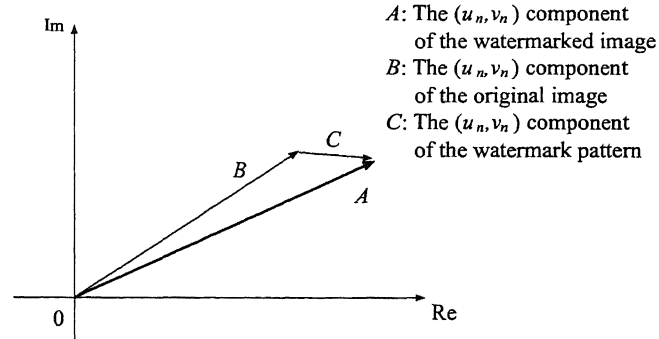


図 3.3: 原画像による影響

3.3.2 位相差を考慮したオフセット探索と透かし情報検出

提案手法における透かし情報検出処理では、まず検出対象画像の任意の位置から $M \times M$ 画素のブロック画像を切り出して離散フーリエ変換する。この時点ではブロック切り出し位置が埋め込み時の透かしパターンの位置からどれだけオフセットしたものか分からない。

そこで、とり得る全てのオフセット候補について (1) 式から算出される位相差を用いて検出対象係数値の値を修正して検出対象系列を作成し、鍵情報から生成される疑似乱数列で逆拡散して各オフセット候補毎のレスポンス値を求める。レスポンス値にピークが現れた時のオフセット候補が実際のオフセットである (図 3.4)。さらにこの時の検出対象系列から埋め込んだ透かし情報を検出する。

透かし情報検出処理への入力検出対象画像、鍵情報であり、出力は検出結果である。以下処理フローを説明する。

step 1. 検出対象画像の任意の位置から $M \times M$ 画素サイズのブロック画像を切り出し、これを離散フーリエ変換して検出対象係数行列 $F(u, v)$ ($0 \leq u, v < M$) を得る。

step 2. 埋め込み処理の step 2. と同様にして $\{(u_n, v_n, w_n)\}$ を生成する。

step 3. 鍵情報 key を初期値とする疑似乱数列 $\{m_n\}$ を用いて、長さ N のオフセット検出用系列 $\{p_n\}$ を以下のようにして得る。

$$p_n \leftarrow m_n \quad (0 \leq n < N)$$

全ての p_n を求めた後、平均値が 0 となるようにシフトする。

step 4. オフセット候補 (o_x, o_y) が $(0, 0) \sim (M-1, M-1)$ を巡回する間、以下を繰り返す

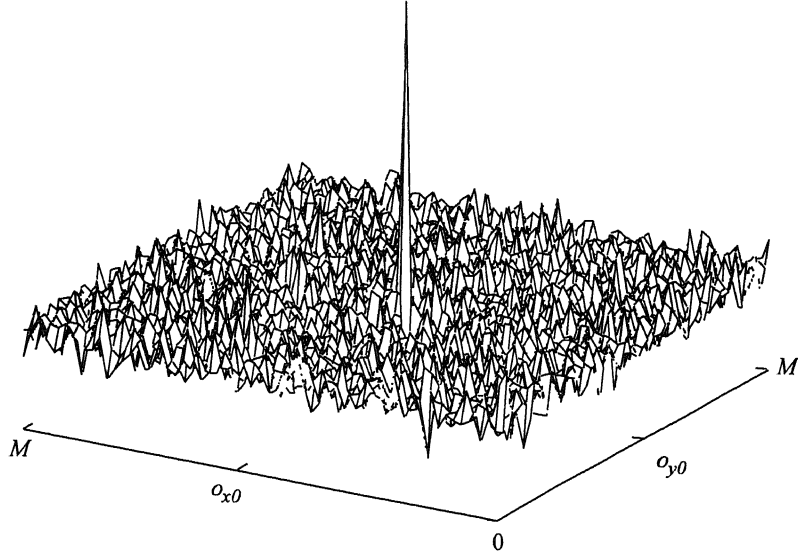


図 3.4: オフセットレスポンス値のピークと検出オフセット

1) 以下の式により長さ N のオフセット検出対象系列 $\{y_n^{(o_x, o_y)}\}$ を求める.

- $w_n = 0$ のとき :

$$y_n^{(o_x, o_y)} \leftarrow \text{Re}(F(u_n, v_n) \cdot e^{2\pi i \frac{u_n \cdot o_x + v_n \cdot o_y}{M}})$$

- $w_n = 1$ のとき :

$$y_n^{(o_x, o_y)} \leftarrow \text{Im}(F(u_n, v_n) \cdot e^{2\pi i \frac{u_n \cdot o_x + v_n \cdot o_y}{M}})$$

全ての n について $y_n^{(o_x, o_y)}$ を求めた後, 平均値が 0 となるようにシフトする.

2) $\{p_n\}$ と $\{y_n^{(o_x, o_y)}\}$ から, 以下の式によりオフセットレスポンス値 Y_{o_x, o_y} を求める.

$$Y_{o_x, o_y} \leftarrow \frac{\sum_{n=0}^{N-1} p_n \cdot y_n^{(o_x, o_y)}}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} y_n^{(o_x, o_y)^2}}$$

step 5. Y_{o_x, o_y} が最大値をとる時のオフセット (o_{x0}, o_{y0}) が検出されたオフセットである (図 3.4). $\{y_n^{(o_{x0}, o_{y0})}\}$ から埋め込まれた透かし情報を表す各シンボル値を検出する. 今, k 番目のシンボル値の検出をしようとしているとする. $l = 0 \sim L-1$ について以下を繰り返す.

1) 長さ N のシンボル値検出用系列 $\{q_n^{(k, l)}\}$ を以下のようにして得る.

$$q_n^{(k, l)} \leftarrow m_{L \cdot k + l + n + 1} \quad (0 \leq n < N)$$

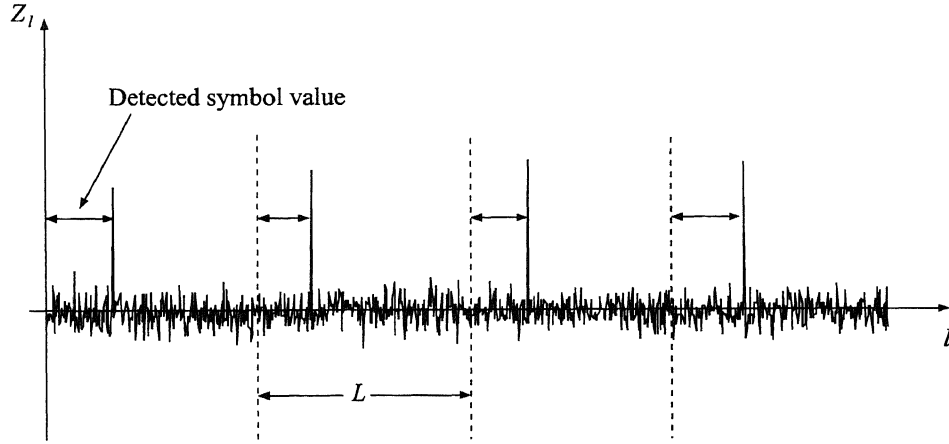


図 3.5: シンボルレスポンス値のピークと検出シンボル値

全ての n について $q_n^{(k,l)}$ を求めた後、平均値が 0 となるようにシフトする。

- 2) $\{q_n^{(k,l)}\}$ と $\{y_n^{(o_{x0}, o_{y0})}\}$ から、以下の式によりシンボルレスポンス値 Z_l を求める。

$$Z_l \leftarrow \frac{\sum_{n=0}^{N-1} q_n^{(k,l)} \cdot y_n^{(o_{x0}, o_{y0})}}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} y_n^{(o_{x0}, o_{y0})^2}}$$

Z_l が最大値をとる時の l が検出されたシンボル値である (図 3.5)。

k は 0 から始まり、透かし情報が固定長と決まっている場合はその長さまでインクリメントする。また透かし情報が任意長の場合は透かし情報を表すシンボルが検出できなくなるまでインクリメントする。

step 6. step 5. で得られた検出シンボル値に対し、埋め込み処理の step 4. における基数変換の逆変換を行い検出された透かし情報として出力する。

3.3.3 透かし情報検出方法の改良

3.3.2 節で述べた透かし情報検出方法を部分的に変更し、以下のような改良が考えられる

A. ブロック毎検出法

検出対象画像を $M \times M$ 画素のブロックに細分し、各ブロック毎に 3.3.2 節で述べた方法を用いる。オフセットの検出は全てのブロックで行う必要はない。step 5. で得られる Z_l の最大値を、全ブロック中での最大値とすることで耐性の向上が期待できる。しかし処理量はブロック数に比例して増大する。

B. 加算ブロック検出法

検出対象画像を $M \times M$ 画素のブロックに細分し、全てのブロックを加算してできる加算ブロックを作成する。この加算ブロックに対して 3.3.2 節で述べた方法を用いる。どのようなサイズの検出対象画像でも 1 ブロック相当の処理量で検出することができ、加算するブロック数を n とすると、透かしパターンは n 倍に強調されるが、原画像のパターンは徐々にキャンセルされるので、耐性の向上が期待できる。

C. 閾値判定法

step 5. の オフセットレスポンス値 Y_{o_x, o_y} の最大値が予め決めた閾値 α より大きくなければ、検出対象画像からの透かし検出に失敗したと判定する。同様に、step 5. のシンボルレスポンス値 Z_l が閾値 β より大きくなければ、透かし情報の検出に失敗したと判定する。閾値の設定の仕方により偽陽性を少なくするか、それとも偽陰性を少なくするかといったことが変更できる。

D. 原画像との差分画像からの検出

透かし情報検出の際に原画像を用いることが可能なアプリケーションの場合、検出対象画像と原画像との差分画像から検出を行う。透かし情報に重畳された原画像による大きな雑音をキャンセルしてから検出を行うので、耐性の向上が期待できる。

3.4 画像の局所的重み付けによる適応的透かし埋め込み

3.4.1 適応的透かし埋め込み方法

3.2 節で述べた透かし埋め込み処理では、画像全体に渡って同じ強さで透かしパターンが重畳される。しかし画像には雑音付加による劣化を知覚され易い部分とされにくい部分がある。劣化を知覚されにくい部分に相対的に強く透かしパターンを埋め込めば、視覚的な品質を保ちつつ耐性を向上できる。そこで 3.2 節で述べた方法を以下のように改良する。

step 7'. 原画像 $I(x, y)$ ($0 \leq x < Width$, $0 \leq y < Height$) から、雑音に対する視覚的特性を考慮して重み行列 $A(x, y)$ ($0 \leq x < Width$, $0 \leq y < Height$) を作成する。 $A(x, y)$ は $I(x, y)$ の各座標の画素値を変更する際に、変更による視覚的刺激を一定以下としたときの対象画素値の変更可能量を表すものが理想的である。

透かしパターン $P(i, j)$ を埋め込み強度 $power$ と重み行列 $A(x, y)$ によって強調しながら, $I(x, y)$ にタイル状に加算し透かし入り画像 $I'(x, y)$ を得る.

$$I'(x, y) \leftarrow I(x, y) + power \cdot A(x, y) \cdot P(x \% M, y \% M)$$

ただし $x \% M$ は x を M で割った余りを表す.

3.4.2 重み行列の作成方法

重み行列の作成方法の例を以下に示す.

step 1. 原画像 $I(x, y)$ ($0 \leq x < Width$, $0 \leq y < Height$) の (x_0, y_0) 座標の画素について, 8つの隣接画素との差分の絶対値

$$d_{ij} = |I(x_0, y_0) - I(x_0 + i, y_0 + j)|$$

$$(-1 \leq i, j \leq 1, i = j = 0 \text{ は除く})$$

が, 閾値 ε より大きい場合に $D(x_0, y_0)$ (初期値 0) をインクリメントする. $D(x, y)$ の最大値は 8 である. 全ての画素にに対して上記処理を行う.

step 2. $D(x, y)$ ($0 \leq x < Width$, $0 \leq y < Height$) を $J \times J$ 要素のブロック $B_{pq}(s, t)$ ($0 \leq s, t < J$, $0 \leq p < Width/J$, $0 \leq q < Height/J$) に細分する. 各ブロック毎にブロック内の成分の総和を求め, これを C_{pq} とする.

$$C_{pq} = \sum_{s=0}^{J-1} \sum_{t=0}^{J-1} B_{pq}(s, t)$$

$$(0 \leq p < Width/J, 0 \leq q < Height/J)$$

step 3. 単調増加関数 $f(x)$ を用いて,

$$B'_{pq}(s, t) = f(C_{pq}) \cdot B_{pq}(s, t)$$

$$(0 \leq s, t < J, 0 \leq p < Width/J, 0 \leq q < Height/J)$$

を求める. 全ての $B'_{pq}(s, t)$ を $B_{pq}(s, t)$ と置き換えて得られる行列を, 重み行列 $A(x, y)$ ($0 \leq x < Width$, $0 \leq y < Height$) とする.

この方法を原画像にそのまま適用すると非常に高いカットオフ周波数を持つハイパスフィルタに似た特性を持つが, 予備実験から若干カットオフ周波数を下げた方が良い結果を得られることが分かった. そのため実際には原画像をダウンサンプルした画像に対して適用し, 得られた重み行列をアップサンプルするなどしてカットオフ周波数を低周波側にずらして用いる.

3.5 実験結果

提案手法の有効性を確認するため計算機シミュレーションを行った。テスト画像として 512×512 画素の 8 bit グレイスケール画像 (lena, sailboat, baboon) を用いた。またシミュレーションに用いたパラメータの値は, $M = 128$, $N = 1023$, $a = 1.4$, $L = 256$, (u_n, v_n) は $16 \leq \sqrt{u_n^2 + v_n^2} \leq 32$ で指定される中周波帯域から選択, 透かし情報は 32 bit (ASCII 文字列 “ABCD”), $\varepsilon = 7$, $J = 16$, $f(x) = x^2$ である。以下, 透かし埋め込み方法は 3.4 節の改良 (縦横 1/2 のダウンサンプルを用いる) を行ったものを, 検出方法は 3.3.3 節の改良法 B. を用いた結果である。

局所的重み付け法

提案手法を用いて透かし情報を埋め込んだ画像と, この画像と原画像との差分絶対値画像 (強調) を図 3.6 に示す。差分絶対値画像から局所的重み付けが機能し, 平坦部分や単純なエッジ部分に比べて劣化が知覚されにくい複雑な領域に強く透かしパターンが重畳されていることが分かる。

透かし入り画像の画質

埋め込み強度 $power$ を変化させた時の PSNR を図 3.7 に示す。ただしグラフ中の $power$ 値は, $power = \xi$ の時を基準にした相対値で表している。画像によって $power$ に対する PSNR に差が生じているが, これは局所的重み付けによるものである。

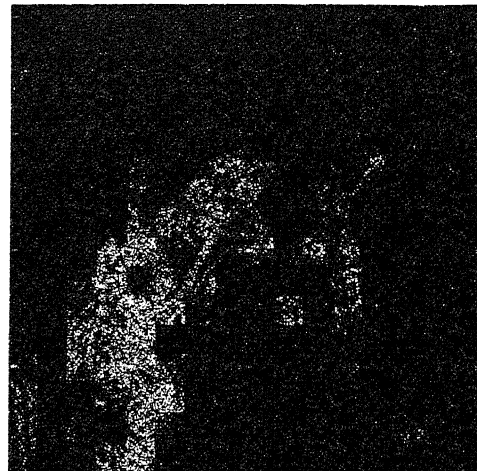
平行移動・切り取り

まず透かし入り画像 (lena, $power = \xi$, $PSNR = 42.107873$) から透かし情報を検出した結果を図 3.8 に示す。オフセット値 $(0, 0)$ においてピーク (14.761541) を検出している。また透かし情報の各シンボル “A”, “B”, “C”, “D” においてもピーク (11.180982~9.108589) を検出しており, 透かし情報の検出は成功している。

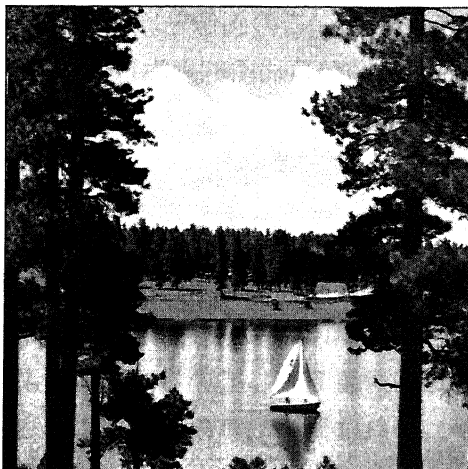
3.3.2 節で述べたシンボルレスポンスの式で, $q_n^{(k,l)} = 1$ または -1 とする (実験ではそのような乱数列を用いている) と, $(q_n^{(k,l)} \cdot y_n^{(o_{x0}, o_{y0})}) / \sqrt{\sum y_n^{(o_{x0}, o_{y0})2}}$ は, 平均 0, 分散 $1/n$ の確率分布に従っているので, N が十分大きければ, 中心極限定理からシンボルレスポンス値は平均値 0, 分散 1 の正規分布 $N(0,1)$ に近似できると考えられる (図 3.9)。これにより検出したシンボルレスポンスピークが有意かどうかの判定のための閾値 (3.3.3 節改良法 C.) を, 検出結果の信頼性 (False Potive 率)



透かし入り lena



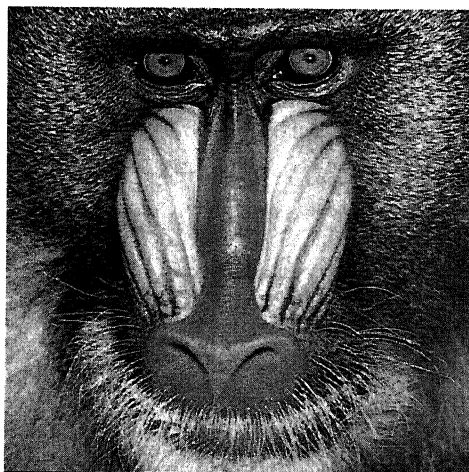
差分画像



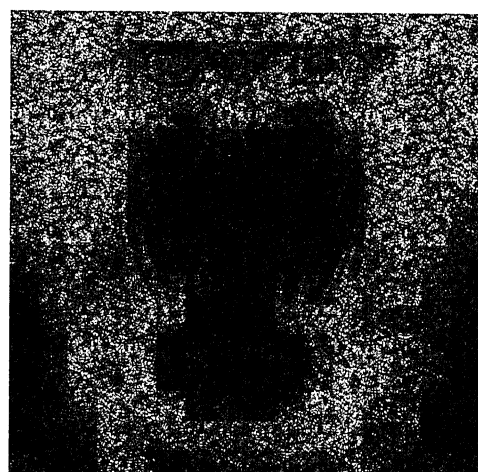
透かし入り sailboat



差分画像



透かし入り baboon



差分画像

図 3.6: 透かし入り画像と原画像との差分画像 (強調)

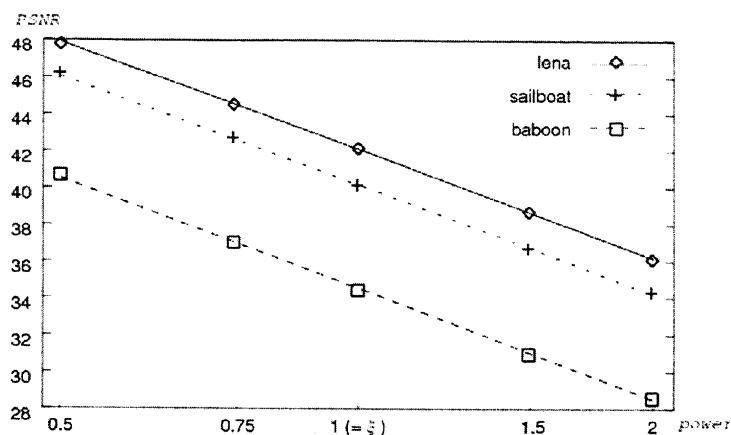


図 3.7: 埋め込み強度と PSNR

によって設定することができる。例えば False Positive 率が 10^{-4} 以下となるように保証するとした場合、シンボルレスポンスに対す閾値は約 5.45553 である。

次に各画像から切り取った部分画像から透かし情報の検出を試みた。部分画像(各サイズ毎に始点をランダムに 50 箇所選んだ)のサイズ $P \times P$ を変化させた時のオフセット検出成功率(正しいオフセットを検出できたときに成功とする)、シンボル検出成功率(全てのシンボルを正しく検出でき、かつ 4 つのピーク値の最小値が閾値 5.45553 より大のときに成功とする)を図 3.10 に示す。 $P = 256$ より大きな部分画像に対しては透かし情報の検出がほぼ確実に可能である。透かし情報は 128×128 画素のブロック毎に埋め込まれているが、図 3.11 (a) に示すようなエッジを含む画像などではいくつかの周波数成分値が大きな値を持ち、これが 3.3.1 節で述べた原画像による大きな雑音となり検出が失敗していると考えられる。逆に図 3.11 (b) のような比較的平坦な画像、あるいはテクスチャ画像などでは検出に成功している。原画像との差分を用いた検出(3.3.3 節 D.) の場合、原画像による雑音がキャンセルされるので検出は成功すると考えられる。

JPEG 圧縮

透かし入り画像 (lena, sailboat, baboon, $power = \xi$) を JPEG で非可逆圧縮して得られる画像から透かし情報の検出を試みた。quality パラメータを変化させた時のオフセットレスポンスピーク値とシンボルレスポンスピークの最小値を図 3.12 に示す。図中の折れ線が途絶えたところまで検出に成功している。3.5.3 節で述べた閾値を考慮すると、実効的な耐性は図 3.12 よりも若干低めだと考えられる。

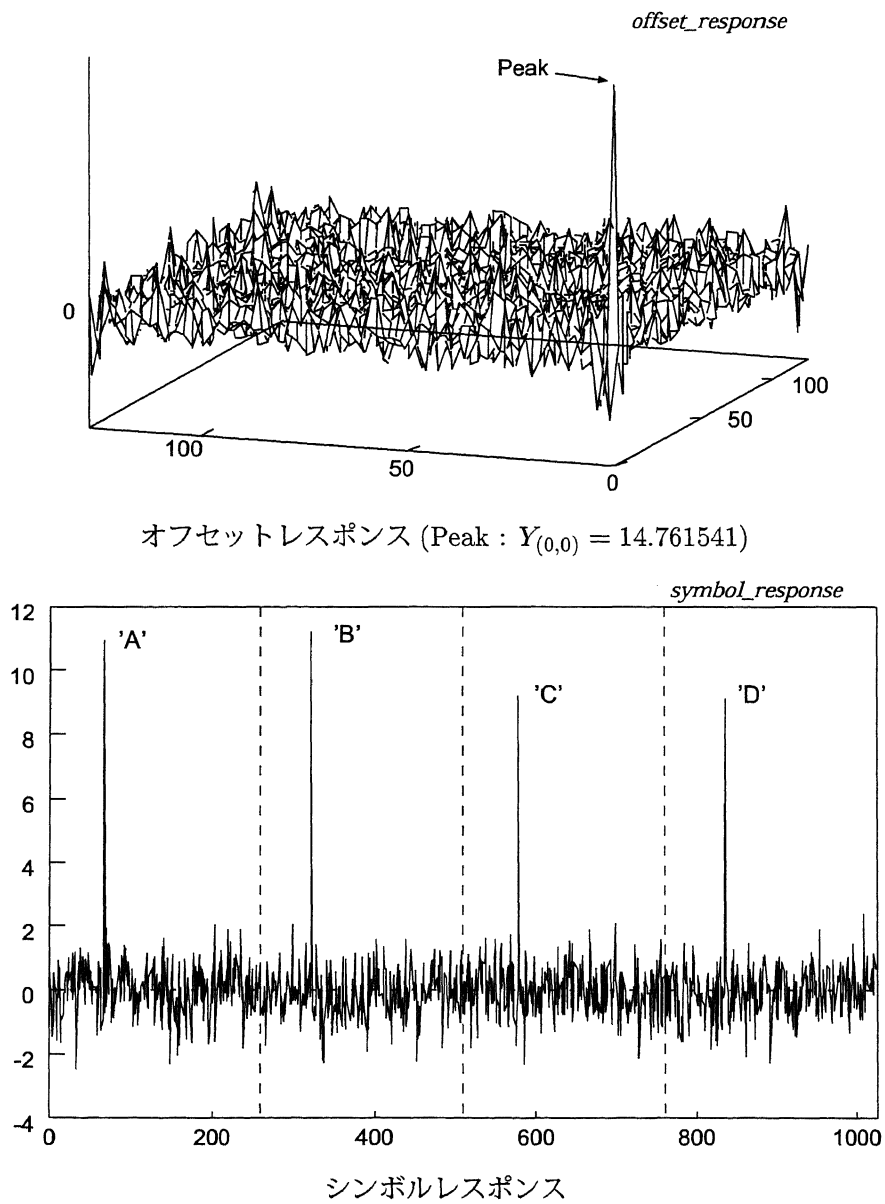
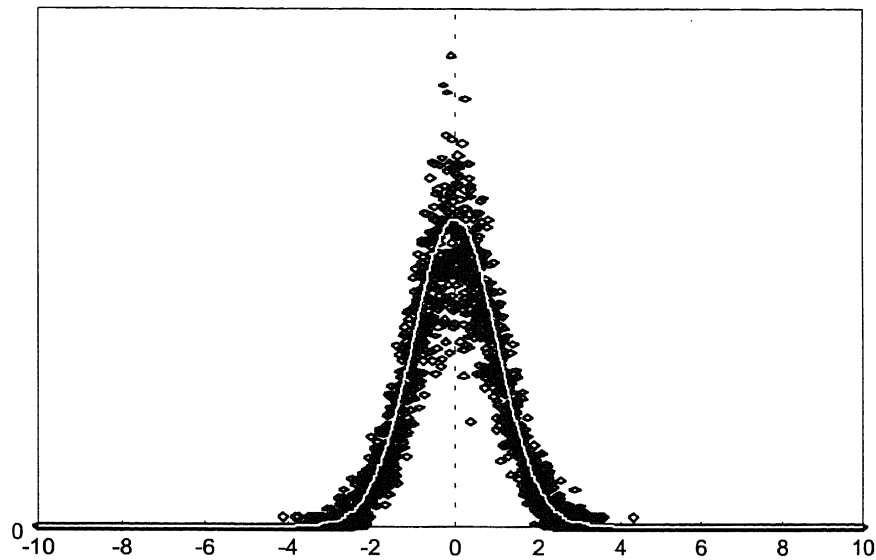


図 3.8: 透かし入り画像 (lena) からの検出結果

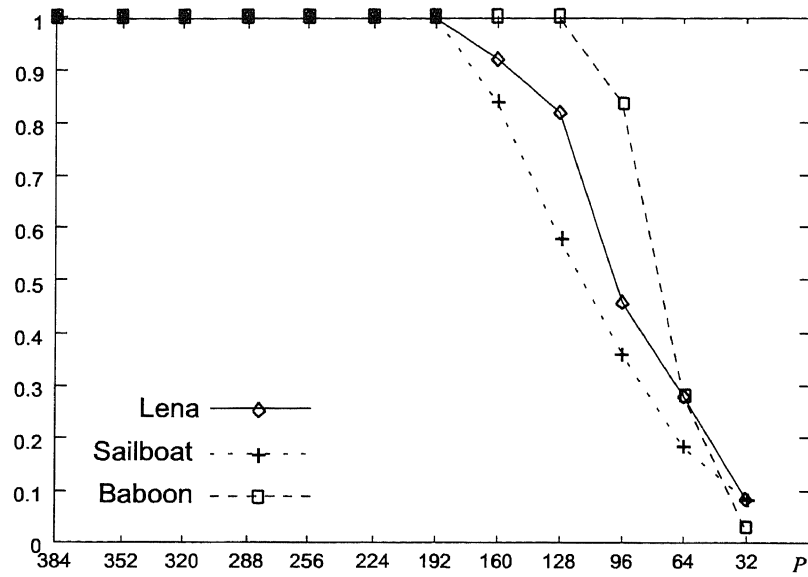
図 3.9: シンボルレスポンスの分布 (白線は $N(0,1)$)

階調変換

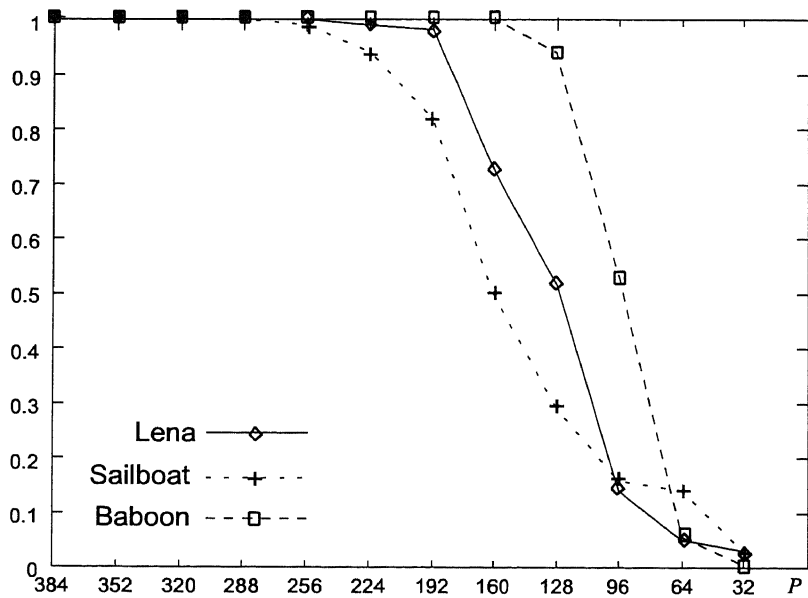
透かし入り画像 (lena, $power = \xi$) を階調変換した画像から透かし情報の検出を試みた. 2 値画像まで落した場合, Floyd-Steinberg 法でディザリングした画像 (図 3.13 (a)) から得られたオフセットレスポンスピーク値は 13.616614, 各シンボルレスポンスピーク値は 9.395720~6.825329 であり, 透かし情報の検出に成功した. また単純な 2 値量子化画像 (図 3.13 (b)) から得られたオフセットレスポンスピーク値は 10.388254, 各シンボルレスポンスピーク値は 8.133438~5.680073 であり, 透かし情報の検出に成功した.

印刷画像からの検出

透かし入り画像 (lena, $power = \xi$) をプリンタで印刷し, それをスキャナで読みとった画像から透かし情報の検出を試みた. 72 dpi の PostScript データに変換した透かし入り画像を, 白黒レーザープリンタ (RICOH SP-10PS Pro/6F, 600 dpi) を用いて印刷し, スキャナ (EPSON GT-6000) を用いて 72 dpi, 16 bit グレyscaleで取り込み, 8 bit グレyscaleに落した画像から検出を行った. この時のオフセットレスポンスピーク値は 9.080504, 各シンボルレスポンスピーク値は 8.139693~5.615208 であり透かし情報の検出に成功した. またプリンタとスキャナの組み合わせから若干アスペクト比が変化することが分かったので, これを補正した場合の検出では, オフセットレスポンスピーク値は 11.701824, 各シンボル



部分画像サイズに対するオフセット検出成功率

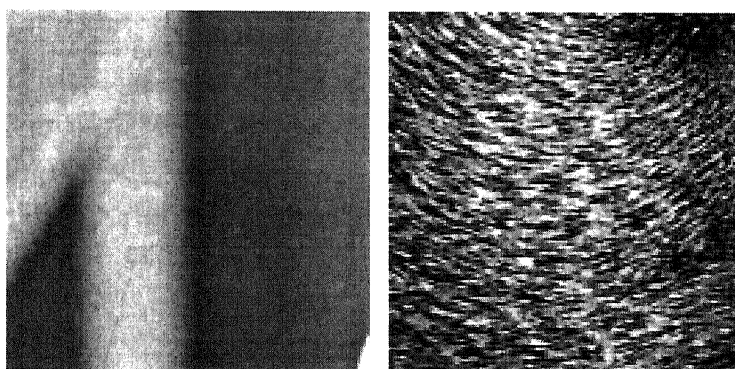


部分画像サイズに対するシンボル検出成功率

図 3.10: 部分画像からの検出結果

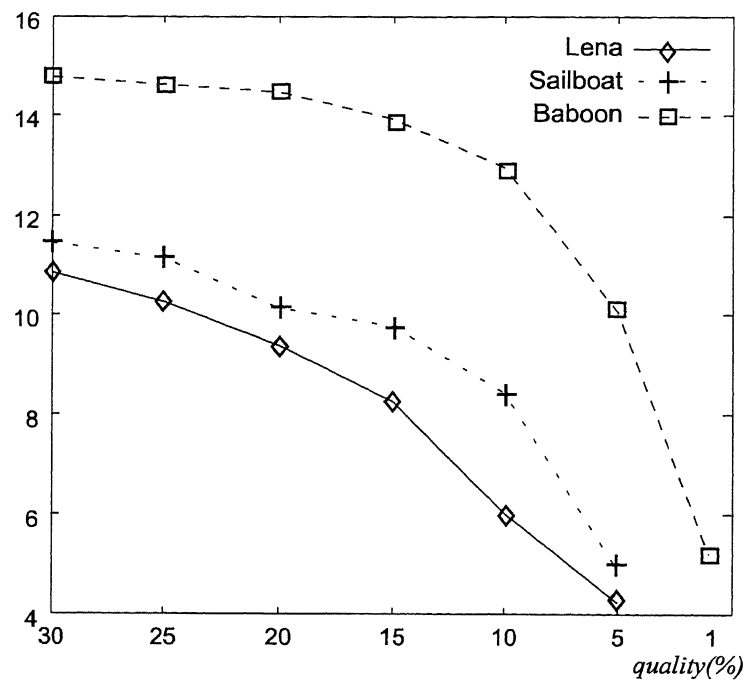


(a) 検出失敗部分画像

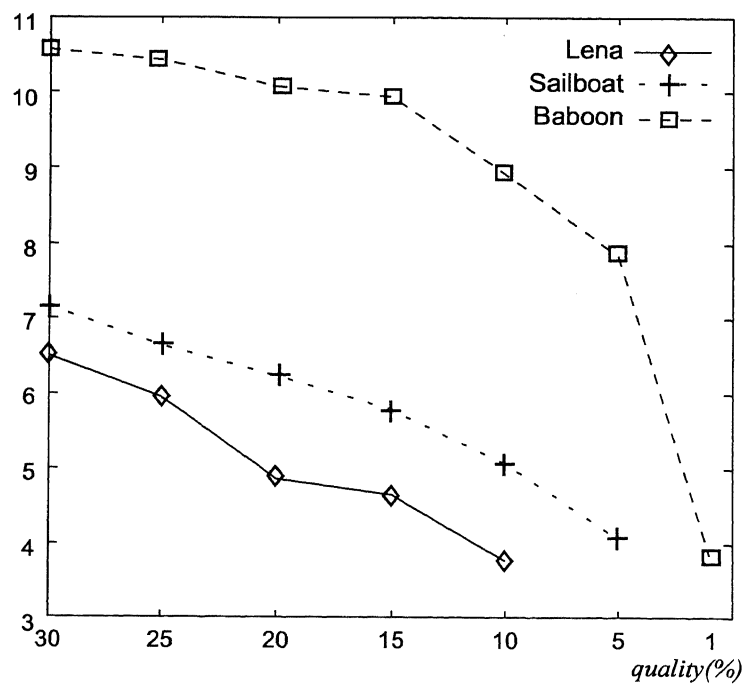


(b) 検出成功部分画像

図 3.11: 検出失敗および成功部分画像 (128 × 128 画素)



オフセットレスポンスピーク値



シンボルレスポンスピークの最小値

図 3.12: JPEG 圧縮画像からの検出結果



図 3.13: 階調変換画像 (2 値画像)

レスポンスピーク値は 8.807638~6.623429 であり透かし情報の検出に成功した。

合成

透かし入りの2枚の画像 (lena, sailboat, どちらも $power = \xi$) を 1:1 の比率で合成して得られる画像 (図 3.14) から, それぞれの鍵情報を用いて透かし情報の検出を試みた. オフセットレスポンスピーク値は lena = 9.549749, sailboat = 9.883106, 各シンボルレスポンスピーク値は lena = 8.102563~6.325033, sailboat = 9.661891~7.285404 であり, 1 枚の合成画像から 2 つの異なる透かし情報を検出することができた.

検出処理時間

提案手法を PC 上に実装して検出処理時間を計測した. 計測に用いた PC のスペックは, CPU: Pentium III 750MHz, メモリ: 512MB, OS: Linux (Fedora Core 2), kernel-2.6.5-1.358, コンパイラ: gcc 3.3.3 (O2 オプションによる最適化) である. 512 × 512 画素の画像を入力した際の検出処理時間は平均 0.24 秒であった.

片山らの研究によれば [72], 携帯電話機上のアプリケーションプラットフォームとして普及している Java ベースの動作環境 (NTT ドコモ社の i アプリ) では, Pentium4 1.5GHz の PC と比べておよそ 50~100000 倍程度処理時間が必要となることが示されている (処理内容によって速度比は異なる). また, i アプリ動作環境は整数演算しか行えず, 使用可能なメモリ量に制限があるため, 2 次元フーリエ



図 3.14: 合成画像

変換など高度画像処理演算は非常に困難であると考えられる。仮に上記 PC の処理時間が片山らの環境の倍程度であるとし、片山らの PC-携帯間の処理時間比として 500 倍程度を想定すると、本手法を i アプリに実装した場合の処理時間はおよそ $0.24 \times 500 / 2 = 60$ 秒程度となる。これはカメラ付き携帯電話機で画像を撮影して電子透かし検出を得るまでの時間としては許容しがたいものであると考えられる。次節では本手法を用いて、クライアント/サーバ (C/S) 方式でのシステムの実現可能性について検討を行う。

3.6 C/S 方式によるカメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの関連情報取得システムの実現可能性検討

コンテンツと識別子 (コンテンツ ID[8]) を不可分にバインドする技術として電子透かしを捉え、この特性を利用してコンテンツを起点に電子商取引に誘導するサービス仲介システムも提案されている [11]。電子透かし技術の持つロバスト性により、デジタルコンテンツだけでなく、アナログ出力された印刷物などからでもコンテンツ ID の検出が可能であり、サービス仲介の適用領域を大きく広げることができると思われる。

ここでは、近年急速に普及してきたカメラ付き携帯電話機を用いたサービス仲介システムの実現のために、カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの電子透かし検出方式について、実現可能性の検討と評価を行う。

3.6.1 サービス仲介システムの概要

カメラ付き携帯電話機を用いたサービス仲介システムの構成を図 3.15 に示す。画像コンテンツには予めコンテンツ ID が電子透かし技術によって不可視に埋め込まれており、これを印刷などによりアナログ出力したものが雑誌広告やポスターなどの形で流通していると仮定する。

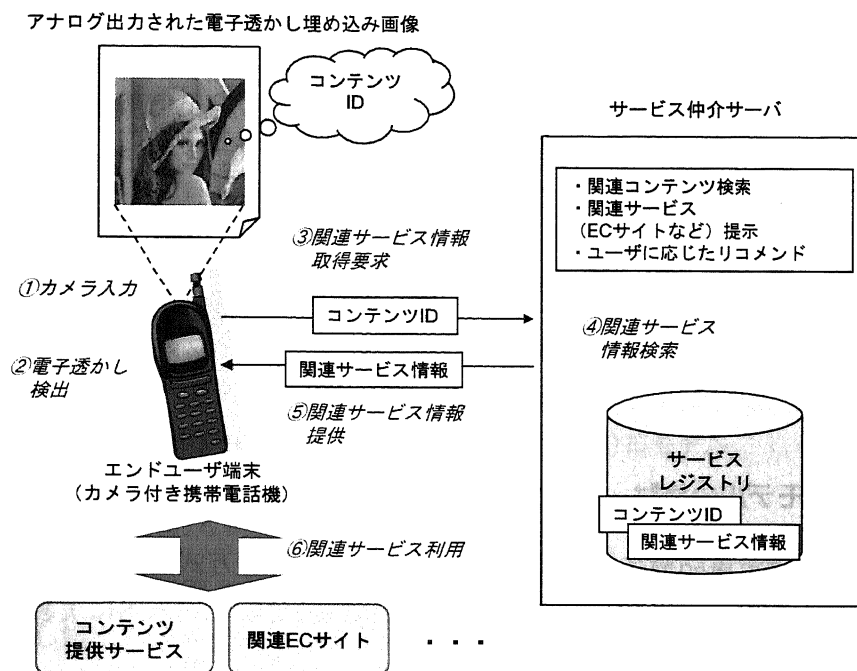


図 3.15: カメラ付き携帯電話機を用いたサービス仲介システム

エンドユーザがアナログ出力された画像コンテンツに関連する情報を取得しようとする場合、エンドユーザ端末でアナログ入力し、電子透かし検出によりコンテンツ ID を読み取り、サービス仲介サーバに送って関連サービス情報を要求する。サービス仲介サーバはコンテンツ ID に関連付けられたサービス情報を検索してエンドユーザ端末に返答する。その後、エンドユーザ端末で関連サービス情報をブラウズすることにより、関連コンテンツ配信やオンラインショップ、チケット予約などの関連サービスを利用することができる。

エンドユーザ端末として、汎用 PC と 30 万画素程度の Web カメラを用いる場合については既に実現されている [11]。しかしカメラ付き携帯電話機をエンドユーザ端末とする場合、特に計算処理能力が低いいため電子透かし検出が困難である。

3.6.2 サービス仲介システムにおける電子透かし検出の要件

カメラ付き携帯電話機をエンドユーザ端末として用いるサービス仲介システムにおいて、電子透かし検出機能は以下の要件を満たす必要がある：(1) ロバスト性：アナログ画像をカメラ入力する際には撮影角度による射影変換などの幾何歪みが生じるため、幾何歪みが生じてでも電子透かし検出が可能なロバスト性が必要である。(2) レスポンスタイム：ユーザビリティの観点から、カメラ入力を行ってから電子透かし検出が終了するまでの時間が短いことが重要である。また、検出処理全体で多少の時間がかかる場合は、入力画像からの検出可否がすぐに分かることも重要である。(3) 通信量：検出処理に伴う通信量（データサイズおよび通信回数）が多い場合、処理時間の増加の問題以外に、通信料金の問題がある。

(1) については電子透かしアルゴリズムによるところが大きいですが、射影変換など複雑な幾何歪みに対してロバストかつ計算量が少ないアルゴリズムの実現は、困難であると考えられる。(2) および (3) については、実装モデルによるところが大きい。

3.6.3 実装モデルの検討

カメラ付き携帯電話機を用いた電子透かし検出の実装方式を考えると、端末の計算処理能力が低いことから、電子透かし検出機能全てを端末内に実装することは難しい。

最も実装が容易なモデルとして、端末でカメラ入力した画像をそのままサーバに送信してサーバ側で電子透かしの検出処理を全て行う、というものが考えられるが、このモデルでは電子透かし検出可否がサーバ側でしか分からないため、検出試行の度に画像データをアップロードしなくてはならない。このため要件 (2) および (3) を満たすことが困難である。

この問題を解決するために、クライアント/サーバ処理分担型のモデルを提案する（図 3.16）。このモデルでは端末側で前処理として電子透かし検出可否判定を行い、検出可能と判定したときのみサーバに検出依頼を行う。また検出依頼の際に画像データをそのまま送るのではなく、圧縮や部分的な検出処理を行うことにより、通信量を削減することも可能となる。従って要件 (2) および (3) を満たすことができる。

提案モデルを有効に機能させるのためには、(a) 高速に処理可能な電子透かし検出可否判定方法 (b) 処理過程データのサイズを小さくすることが可能な電子透かしアルゴリズムが必要となる。

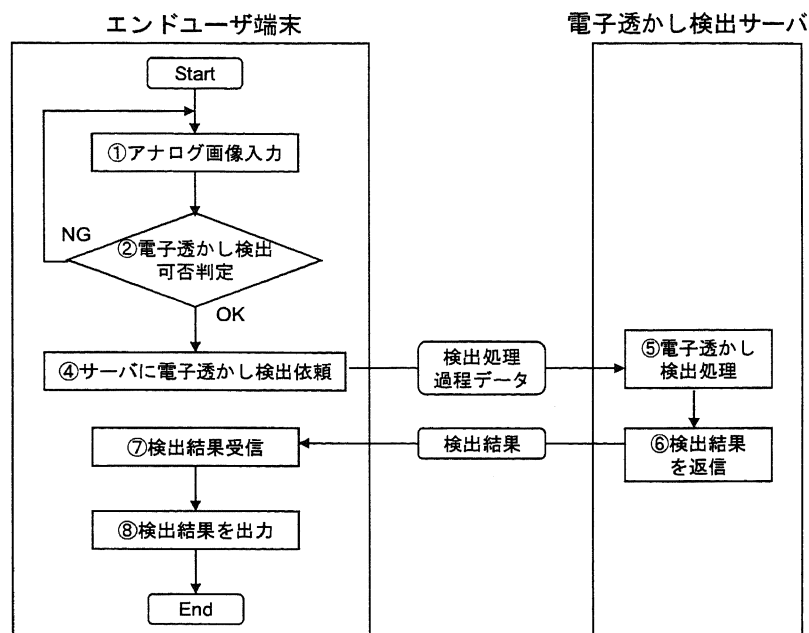


図 3.16: クライアント/サーバ型処理分担モデル

3.6.4 実現例の検討と評価

提案モデルの実現例として、画像認識技術による幾何歪み補正を組み合わせた電子透かし検出方式を提案する。

図 3.17 に示すように、電子透かしを埋め込んだ画像をアナログ出力する際に幾何歪み補正のための補正マーカを付加し、電子透かし検出の際には、その前処理として補正マーカ認識による幾何変換パラメータの推定を行う。ここで推定した幾何変換パラメータの値を利用し、幾何歪みが予め定めた範囲か否かにより電子透かし検出可否判定を行う。

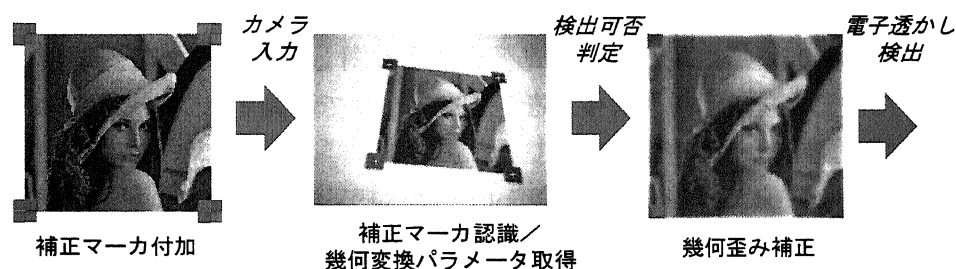


図 3.17: 補正マーカを用いた幾何歪み補正と検出可否判定

評価用の電子透かしアルゴリズムとして、本章で提案した手法に不可視キャリブレーションパターンを用いて2次元アフィン変換耐性 [16, 53] を持たせたものを

用いた。この手法は射影変換などの複雑な幾何歪みに対応したものではない。撮影角度毎の電子透かし検出性能を図 3.18 に示す。平均シンボルピーク値が大きいほど電子透かし検出の確実性が高くなる。本実現例は、補正マーカを用いた射影変換補正と組み合わせることで高いロバスト性を実現しており、要件 (1) を満たすことが分かる。

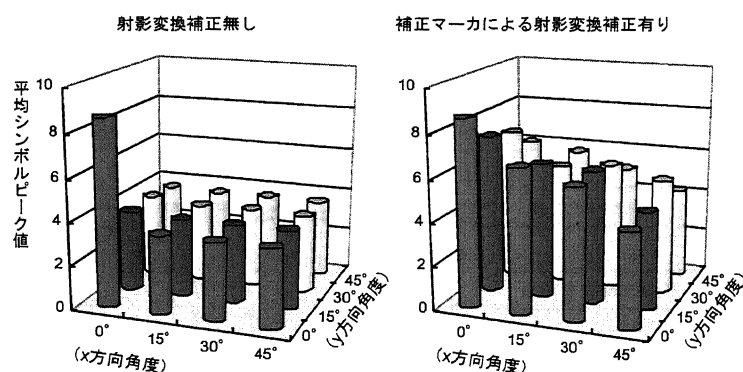


図 3.18: 撮影角度毎の電子透かし検出性能

条件 (a) に関しては、例えば x,y 方向の撮影角度が ± 15 度の範囲ならば検出可能と判定するなどの基準により、検出可否判定を行うことが可能である。また処理速度については、本実現例の補正マーカ認識は一般的なパターンマッチング処理でありそれほど処理量が大きくないと考えられる。以上から本実現例が条件 (a) を満たすことが分かる。

条件 (b) に関して、本章の手法では、画像データをより小さな輝度ブロックに縮退して検出を行うことから（加算ブロック法）、検出依頼時（図 2 の ）に輝度ブロックのみを処理過程データとして送信する方法が考えられる。320 × 240 画素、24 ビットカラーのカメラ入力画像を非圧縮で送信する場合は 225K バイト、画質劣化により検出成功率が低下してしまうが JPEG 圧縮した場合でも約 20K バイトのデータをサーバに送信する必要がある。これに対し本実現例では、検出成功率を維持したままで送信データサイズを 6K バイトまで削減することが可能であり、通信量削減の観点でも有効である。

以上から本実現例は条件 (a)(b) を満たし、提案モデルを実現するものである。また、要件 (1)(2)(3) を満たすものであるといえる。また、この実現例においては、補正マーカを「サービス仲介可能な画像」を意味するマークとしてエンドユーザにアピールすることにより、ユーザビリティ向上という副次的効果も期待することができる。

3.7 本章のまとめ

カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの関連情報取得システム実現への予備検討として、PCでの動作を前提としたアナログ出力耐性を有する静止画電子透かし手法を用いたクライアント／サーバ（C/S）方式について検討を行った。

アナログ出力耐性を有する電子透かし手法として、画像の空間周波数成分にスペクトラム拡散された透かし情報を重畳する静止画向け電子透かし手法を示した。提案手法では画像の空間周波数成分（フーリエ係数）の実部と虚部を独立したチャネルとみなして埋め込みを行うことによって、従来手法であるフーリエ係数の振幅に埋め込みを行う手法に対して拡散率を倍増させることが可能であり、それにより高いノイズ・圧縮耐性を実現した。また、画像中の劣化の知覚されにくい領域に重みを付けて透かしパターンを重畳することにより、画質・耐性を向上する方法を提案した。また、実サービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法として、従来と同様直交符号化の際の False Positive 率を保証する方法について示した。評価実験により、印刷出力されたアナログ画像からでも電子透かしの検出が可能であることを確認できた。しかしながら、提案手法においては Message Error の定量化が未だなされていないという課題が残っている。

また、カメラ付き携帯電話機を用いて印刷物などのアナログ出力コンテンツから関連情報を取得するシステムとして、本手法を用いた C/S 方式について、その有効性を検討し、補正マーカを用いることで平面射影歪みに対応可能とする見通しが得られた。補正マーカについては、次章で述べる画像の縁を利用した射影歪み補正手法を用いることで、実際に携帯電話機上での高速処理が期待できる。

しかしながら、送信データ削減処理については、携帯電話機におけるメモリ参照速度の遅さ [72] を考慮すると、それほど高速に処理することができない可能性が高い。さらに C/S 方式では、検出試行の度に通信処理を伴う必要があり、応答時間や通信コスト、電波状況などによる利便性の問題が大きいという懸念事項もある。特に、携帯電話機による外部サーバとの通信の確立等、実際のデータの授受以外にかかるオーバーヘッド時間が比較的長い、という問題がある。これは通信データ量にかかわらずに必要な時間であり、本実験で用いた端末では数秒～10秒程度はこの部分に費やされていた。このため、仮に通信データ量を削減したとしても利便性が大幅に向上するとは言い難い面がある。また、検出試行の度に通信料金などのコストが発生すること、および電波状況が悪い場合にはそもそも通信不能であるため電子透かしの検出を行うことができない、という問題もある。

これら根本的課題を解決するためには、携帯電話機上のスタンドアロン処理で電子透かし検出を実現することが望まれる。これらの課題については次章におい

てその解消を図る。

第4章 カメラ付携帯端末向けの高速な静止画電子透かし技術

本章では、第3章で示したC/S方式における通信処理に伴うコスト問題を本質的に解決するため、カメラ付き携帯電話機上でスタンドアロン処理で高速に検出処理が可能な静止画電子透かし方式について示す。提案方式は画像の縁を利用して撮影角度によって生じる幾何歪みの補正をすることで空間同期をとり、さらに安定した特性を有する2次元ブロックパターン変調を用いることに微小な幾何歪みに対処し、スペクトラム拡散変調によりノイズに対するロバスト性を実現する。さらに、実サービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験によって、提案手法は携帯電話機上のJavaアプリケーションとして実装した場合でも、1秒以内に電子透かし検出処理を完了することができ、また、十分なロバスト性を有することを確認する。

4.1 まえがき

コンテンツ自体の情報を人間には知覚できない程度の微小量だけ変更し、コンテンツ内に別の情報を埋め込む技術である電子透かし技術は、コンテンツ保護技術として従来数多く提案されてきた[38, 4, 16, 5, 73, 47]。電子透かしの特性としては不可知性以外に、コンテンツに加えられる様々な変更、例えば符号化による雑音付加や、画像の変形などが施されても埋め込まれた情報を正しく検出可能であるというロバスト性(耐性)がある。画像電子透かし技術においては、電子透かし入り画像に対して印刷などのアナログ出力を行い、再度デジタル化(D/A→A/D変換)しても埋め込まれた情報が検出可能な技術も提案されている[4, 5]。

このような画像電子透かしの不可視性、D/A→A/D変換に対するロバスト性を利用して、アナログ出力された電子透かし入り画像コンテンツから透かし情報を読み出し、透かし情報を元にコンテンツに関連するデジタル情報を提供する応用システムであるコンテンツ関連サービス紹介システムが提案されている[12, 11](図4.1)。これにより実世界のオブジェクトである印刷物やTV表示画面などのアナログコンテンツから、サイバー世界のオブジェクトであるデジタル情報やサービス

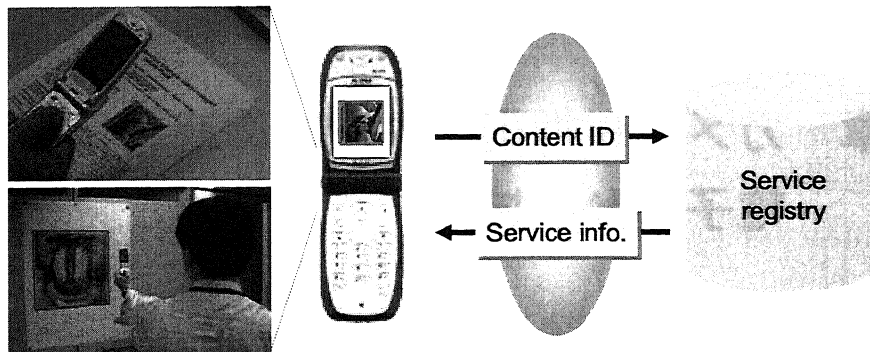


図 4.1: 電子透かしを用いたコンテンツ関連サービス紹介システム

にスムーズにつなぐことができる。同様な技術としてはバーコード等が既に実用化されている [21, 23, 24, 25]。しかし、コンテンツ以外にバーコードの出力領域が必要となるスペース効率の点、および利用者がコンテンツとバーコードの対応関係を意識しなくてはならないという2点において、電子透かしを用いることのメリットがある。すなわち電子透かしは不可視なバーコードとして画像コンテンツと一体化しているため余計なスペースは必要なく、さらにコンテンツを直接スキャンして電子透かしを読み取ることができ、直感的な操作感を提供できる。

しかしながら、一般に電子透かしの検出は複雑な画像処理を伴うため計算量が多く、そのためコンテンツ関連サービス紹介システムではPCを利用者端末として議論されていた [11, 13]。一方、アナログ入力可能なモバイル端末として、カメラ付き携帯電話機が広く普及してきている。カメラ付き携帯電話機をコンテンツ関連サービス紹介システムの端末とすることができれば、町を歩いているときに見かけた看板や、TVに映っている映像や、雑誌や新聞の写真などのアナログ媒体から、いつでもどこでも関連するデジタル情報を取り出すことができ、サービスの可能性が大きく広がるだろう。この利点を鑑み、前章においてカメラ付き携帯電話機を用いたクライアント/サーバ型電子透かし検出方式を提案した [74]。しかし、携帯電話機で撮影した画像データをサーバに送信し、サーバ側で電子透かし検出処理を行うため、通信処理に伴うコスト (応答時間、通信料金) の低減が課題となっていた。

本章では上記の課題を根本的に解決するため、携帯電話機上でスタンドアロン動作させても実用的な処理時間で検出処理を行えるように、高速な電子透かしアルゴリズムおよびこれを用いた端末上電子透かし検出方式を提案する。またサービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法についても議論する。そして、実験評価によって提案方式の有効性を示す。

4.2 要求条件

4.2.1 高速性

携帯電話機上で電子透かし検出処理を実装する手段として、組み込みソフトウェア/ハードウェアとしての実装と、既存端末上のロード可能なソフトウェアとしての実装が考えられる。前者は実行環境として高い処理能力をもつため、多少複雑なアルゴリズムでも実装できるというメリットがある。後者は既存端末に直接適用可能なため、すぐに実サービスを開始できるというメリットがある。後者については、日本における携帯電話機上のロード可能なソフトウェア実行環境としてi-appliというJava実行環境が既に存在する[75]。i-appliとして電子透かし検出処理を実装することは、ただでさえ処理能力の低いアプリケーション・プロセッサ上のJava VM インタプリタで動作させることを考えれば、組み込み実装に比べ高い処理能力をあまり期待することはできない。しかし、電子透かしを用いたコンテンツ関連サービス紹介システムの市場の立ち上げ、普及の観点から、まず既存端末上のロード可能なソフトウェアとして実装することはビジネス戦略上重要であると考ええる。そこでi-appli上の実装を前提条件とすることにした。

また許容可能な処理時間（応答時間）については、Shneiderman によってまとめられたガイドラインによれば[76]、以下のようにタスクの性質によって異なってくる。

- タイプ入力，カーソル移動，マウスによる選択：50～150msec.
- 簡単で頻繁に行うタスク：1秒以内
- 通常のタスク：2～4秒
- 複雑なタスク：8～12秒

本研究においては、カメラ付き携帯電話機で画像を撮影して電子透かしを検出するタスクは、「簡単で頻繁に行うタスク」あるいは「通常のタスク」に分類されるものと考えられる。よって、ユーザが撮影をしてから電子透かし検出結果を得るまでの時間が1秒以内であることがユーザインタフェース上の要件として適切であると考ええる。

4.2.2 ロバスト性

電子透かし入り画像をD/A変換してアナログ出力し、それをカメラ付き携帯電話機で撮影してA/D変換する場合、(1)D/A変換の歪み(印刷による劣化など)、

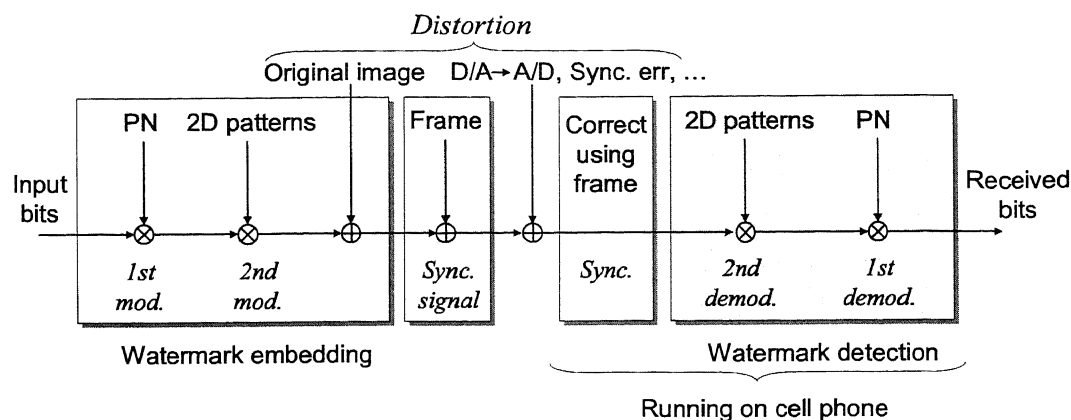


図 4.2: 提案方式のモデル

(2)A/D変換の歪み(カメラデバイス性能による劣化など), (3)撮影条件によって生じる歪み(幾何歪みなど), といった歪み要因がある。電子透かし方式には, これらの歪み要因に対するロバスト性が要求される。

4.3 提案する電子透かし方式

4.3.1 設計方針

提案する電子透かし方式のモデルを図4.2に示す。電子透かしを通信モデル的に考えれば, 透かし情報を変調して, 加法的な雑音である原画像信号, D/A→A/D変換による歪み, および撮影角度に伴う幾何歪みによる同期外れなど, 大きな歪みを持つ通信路を通じて送信し, 復調するということになる。

撮影角度による射影歪みなどの大きな同期外れについては, 文献[74]と同様に画像にキャリブレーションパターンを付加し, これを用いて同期を回復することにより対処する。次に補正誤差や紙面の波打ち, レンズ歪みなどの微少な歪みによる同期外れについては, 安定した特性を持つ2次元ブロックパターン変調を用いることにより対処する。最後に, 加法的雑音については, 1次変調としてスペクトル拡散を用いることにより対処する[73]。

以下, 提案する電子透かしアルゴリズムおよび検出方式について詳細に説明する。

4.3.2 電子透かし埋め込みアルゴリズム

図4.3に電子透かし埋め込みフローを示す。電子透かし埋め込み処理は, 原画像 $I = \{I_{x,y}\}$ ($W \times H$ 画素), k -bit の透かし情報 ID , および画質と耐性のバランス

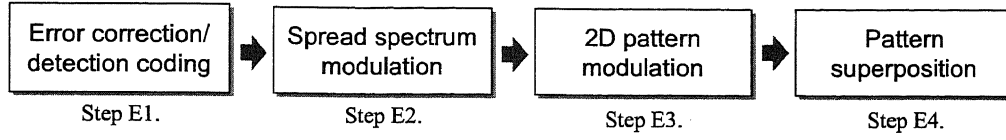


図 4.3: 電子透かし埋め込み処理フロー

を制御するパラメータである埋め込み強度 a を入力とする．以下の議論では $I_{x,y}$ は輝度値であるとする．

[Step E1.] 誤り訂正/検出符号化

入力された透かし情報 ID に対して誤り訂正および誤り検出符号化を行い， n -bit の符号語 $Code$ を得る．ここで用いる誤り訂正/検出符号の誤り訂正能力および検出能力は，3.5 節で述べる検出透かし情報の信頼度評価の際に重要となる．

[Step E2.] スペクトル拡散変調

予め定めた整数値 N を用いて，符号語 $Code$ の各ビット値 c_j を $l = N^2/n$ 回繰り返して引き延ばして得られる長さ N^2 の系列を

$$\{b_i\} = \overbrace{c_0 \dots c_0}^{l \text{ times}} \dots c_{n-1} \dots c_{n-1} \quad (4.1)$$

とする．また，長さ l の疑似乱数列 $\{r_i^{(j)}\}$ ($r_i^{(j)} = \pm 1$, $\sum_{i=0}^{l-1} r_i^{(j)} = 0$) を $j = 0 \dots n-1$ について用意し，これらを並べた長さ N^2 の系列を

$$\{r_i\} = r_0^{(0)} \dots r_{l-1}^{(0)} \dots r_0^{(n-1)} \dots r_{l-1}^{(n-1)} \quad (4.2)$$

とする．まず，

$$s_i = b_i r_i \quad (i = 0 \dots N^2 - 1) \quad (4.3)$$

により直接拡散変調を行う [73]．ただし b_i の値は，ビット値 "0" の時は -1 ，"1" の時は $+1$ と読み替えて計算する．次に，疑似ランダムに決定される置換

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & \dots & N^2 - 1 \\ o_0 & o_1 & o_2 & o_3 & \dots & o_{N^2-1} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

を用意し，この置換を用いて $\{s_i\}$ の並びをスクランブルすることにより，埋め込み系列 $\{t_i\}$ を算出する．

$$t_i = s_{o_i} \quad (i = 0 \dots N^2 - 1) \quad (4.5)$$

スクランブルはインターリーブ符号化としての効果を持ち，ビット間の耐性の不均衡を防ぐことに寄与する．

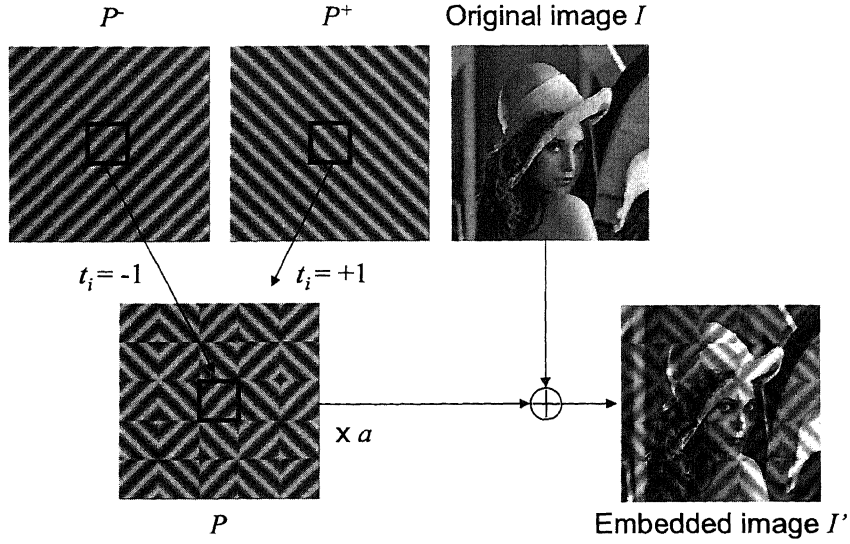


図 4.4: 2次元パターン変調と重畳

[Step E3.] 2次元パターン変調

図4.4のように、画像サイズに対する相対周波数が $(Freq, Freq)$ および $(Freq, -Freq)$ である90度回転対称の2つの2次元サインカーブ $P^- = \{P_{x,y}^-\}$, $P^+ = \{P_{x,y}^+\}$ を生成し、それぞれ $N \times N$ 個のブロックに分割して、ブロック画像群 $\{P_{x,y}^{-(h,v)}\}$, $\{P_{x,y}^{+(h,v)}\}$ を得る。次にブロック分割における各ブロック位置 (h, v) について、ブロックのラスタスキャン順に沿って埋め込み系列の項 t_i ($i = h + vN$)を選び、 t_i の値に応じて透かしパターンのブロック画像 $P_{x,y}^{(h,v)}$ を以下のように選択する。

$$P_{x,y}^{(h,v)} = \begin{cases} P_{x,y}^{-(h,v)} & , \text{ if } t_i = -1 \\ P_{x,y}^{+(h,v)} & , \text{ if } t_i = +1 \end{cases} \quad (4.6)$$

これを全てのブロック位置 (h, v) に対して行うことで、 $W \times H$ 画素の透かしパターン $P = \{P_{x,y}\}$ を得る。

[Step E4.] パターン重畳

P の振幅を埋め込み強度 a で増幅して I に加算し、電子透かし埋め込み画像 $I' = \{I'_{x,y}\}$ を得る(図4.4)。

$$I'_{x,y} = I_{x,y} + aP_{x,y} \quad (4.7)$$

$$(x = 0 \dots W - 1, y = 0 \dots H - 1)$$

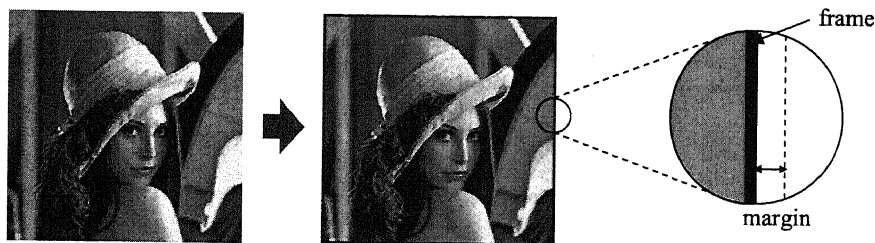


図 4.5: 電子透かし埋め込み画像への枠線の付加

なお、パターン重畳の際には、文献 [5] で示されている視覚特性を考慮した局所適応的埋め込みを容易に適用でき、画質・耐性バランスのさらなる向上を図ることができる。

4.3.3 D/A, A/D 変換と空間同期

電子透かし埋め込み画像への枠線の付加

前節により電子透かし埋め込み画像を得た後、画像を囲むように枠線を付加し、紙などのアナログ媒体に出力する [72](図 4.5)。アナログ出力された枠線付加電子透かし埋め込み画像は雑誌やポスター等の形で流通する。電子透かしの検出を試みる利用者は、枠線付加電子透かし埋め込み画像をカメラ付き携帯電話機により撮影して再デジタル化する。枠線はカメラ撮影時の幾何歪みによる同期外れに対応するためのキャリブレーションパターンとして機能する。また WWW ブラウザ上のハイパーリンクを表す下線等と同様に、当該画像に電子透かしが埋め込まれており関連情報を取得可能であることを表すインジケータとしても有用である。

[Step D0.] 枠線を用いた空間同期処理

電子透かし検出処理に先立ち、撮影角度によって生じた幾何歪みの補正、すなわち空間同期処理が必要となる。以下に処理の概略を示す (図 4.6)。

- (1) 撮影画像の上下左右各辺の midpoint から中心に向かってそれぞれスキャンし、エッジ点 (微分値が十分に大きい点) をサーチする
- (2) エッジ点が見つかったら、サーチ方向と直行する方向にエッジをトレースして線分を得る
- (3) 十分な長さを有する線分のみを残し、検出対象の矩形の上下左右の各々の辺の候補とする

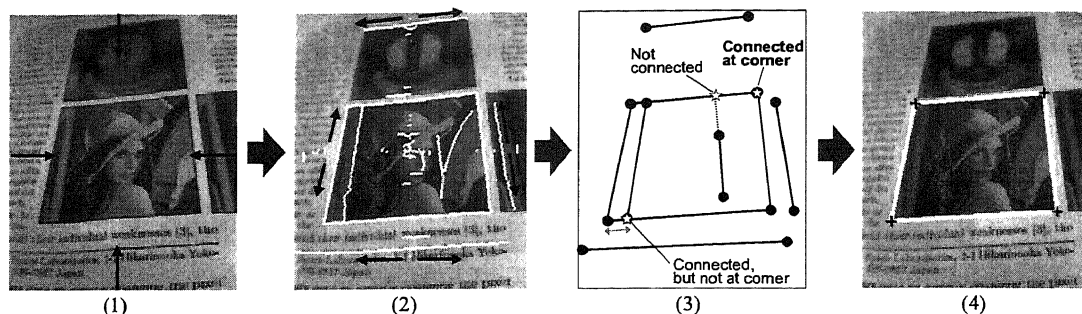


図 4.6: 矩形検出処理の流れ

- (4) 各垂直方向，水平方向の辺候補線分の交点を求める（必要なら線分を延長した直線の交点を求める）．矩形の隅における連結性に基づき，交点とそれを構成する線分の端点が近いものが矩形を構成すると判定する．最終的に，選択された中で最大の矩形を検出結果とする．

この方法は，枠線を認識して枠のコーナー4点の座標を見つけ，この4点を基準となる4点のテンプレート点と対応付けして射影変換パラメータを推定し，逆射影変換をキャプチャ画像に施すことにより射影歪み補正を行うものである．4点のテンプレートは後述するように一辺 $4Freq$ の正方形とし，これによってサイズの正規化を行う．

また，この方法では背景と矩形縁とのコントラスト差を用いて辺を追跡している．そのため，元の画像の縁と背景とのコントラスト差が十分に大きい場合は枠線の付加は不要であるが，枠線を付加することにより，例えば白い紙の上の明るい画像のようなコントラストが不明瞭な画像に対しても，ロバストな矩形検出を実現できる．さらにこの方法は，ユーザはターゲットとする矩形画像を中央に置いてかつ大きめに撮影しがちであるという傾向に基づいたヒューリスティックアプローチである．このアプローチにより，矩形検出の際に参照する画素数を大幅に減らすことができる（典型的には撮影画像の全画素数の1割以下）．i-appli 上でのフレームバッファへのアクセスは処理時間がかかるため [72]，この方法により高速処理が期待できる．

4.3.4 電子透かし検出アルゴリズム

検出対象画像は，幾何歪み補正の誤差や紙面の波打ちなどによる若干の歪みを除けば，電子透かし埋め込み直後の画像と比べてサイズスケールおよび0度，90度，180度，270度のいずれかの90度毎回転変換因子のみが異なる画像として取

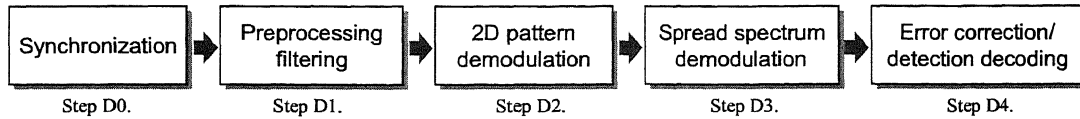


図 4.7: 電子透かし検出処理フロー

得できる．サイズスケールが異なる点については，電子透かしの埋め込みが全て画像サイズに対する相対スケールで行われている点から，サイズの正規化を行えばその違いを吸収できる．90度毎の回転変換因子は，カメラ撮影の際に枠線付加画像をどの方向から撮影したかによって決まるが，前節の方法ではこの不確定性については解決できない．しかし0度から90度までの範囲の半端な回転変換因子，および平行移動因子は，補正によって正しく同期が合った状態となる．

以上の議論から，電子透かし検出に求められる幾何歪みに対するロバスト性としては，微少な歪みおよび90度毎の回転変換因子への対応のみで十分であることが分かる．またD/A→A/D変換により生じた加法的雑音も加わっていると考えられる．よって電子透かしアルゴリズムには以上の2点に対するロバスト性が求められる．図4.7に電子透かし検出フローを示す．以下，検出対象画像からの電子透かし検出処理を詳細に説明する．

[Step D0.] 画像サイズの正規化

まず，検出対象画像のサイズを予め定めたサイズに正規化する．3.2節で述べた電子透かし埋め込み処理では，電子透かしは画像サイズに対する相対スケールで埋め込まれているため，正規化によりサイズスケールの違いを吸収できる．さらに，次節で述べる前処理フィルタリングを効率的に行えるという効果がある．実際には，枠線認識後の射影歪み補正時に用いるコーナー座標テンプレートのサイズを正規化サイズにしておき，補正直後の検出対象画像の時点で既にサイズ正規化が済んでいるようにする．正規化画像は正方形とし，その大きさ $R \times R$ は，埋め込み時の相対周波数パラメータ $Freq$ を用いて，以下のように定める．

$$R = 4Freq \quad (4.8)$$

[Step D1.] 前処理フィルタ

正規化検出対象画像に対しフィルタ処理を施し，電子透かし信号に加えられた雑音である原画像信号を低減させ，電子透かしのロバスト性を向上させる．フィルタ処理には図4.8に示すような4画素を参照する畳み込みオペレータを用いる．

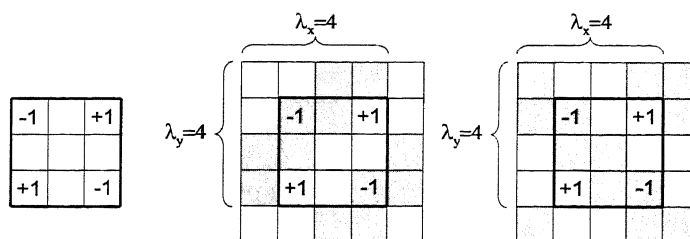


図 4.8: 前処理フィルタの畳み込み行列とその効果

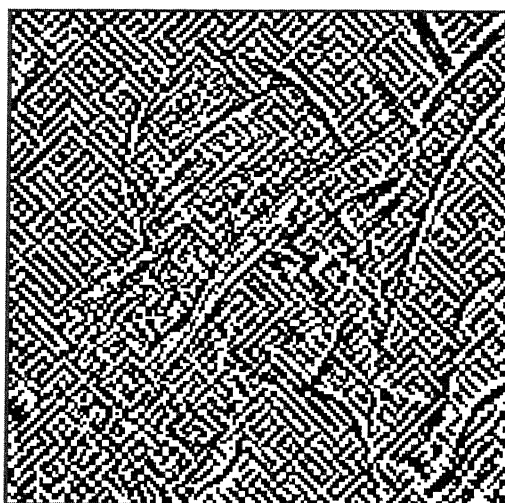


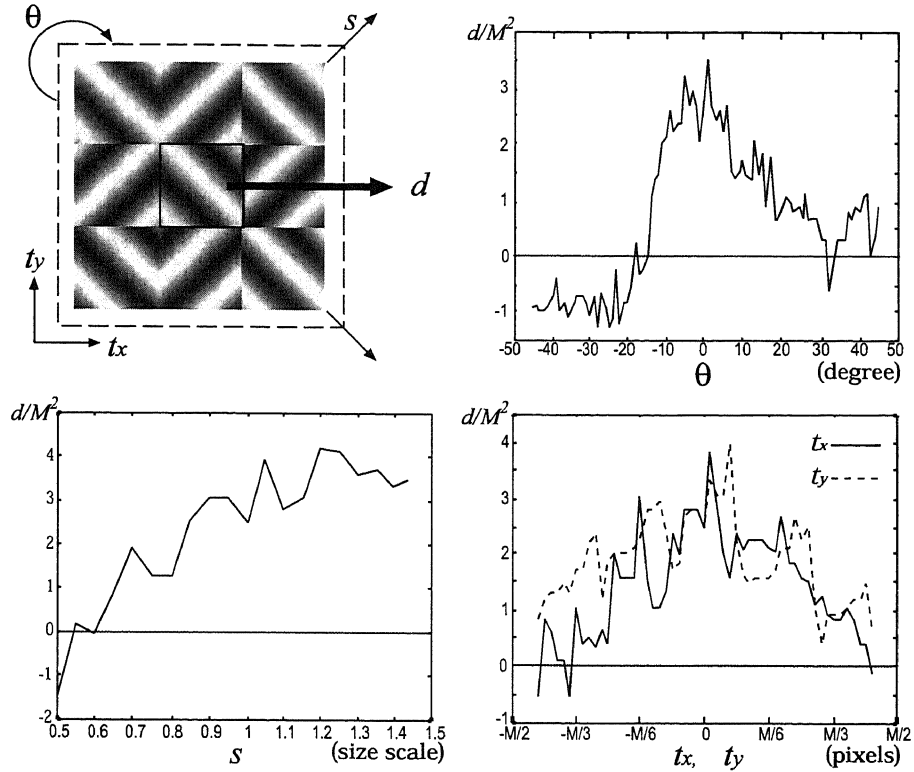
図 4.9: 前処理フィルタ処理画像例

このような畳み込みオペレータを用いる理由について説明する．(8)式から，埋め込みに用いた2つの2次元サインカーブの波長は，正規化画像においては x, y 方向とも $\lambda_x = \lambda_y = 4$ となる．よってこの畳み込みオペレータを用いれば，図4.8のように2つの2次元サインカーブのどちらの成分も一度の走査で効率よく拾うことが可能であり，処理の高速化に寄与する．

さらに，フィルタ処理後の画素値について，値の正負および0によって3値化するクリップ処理も同時に行う．クリップ処理により雑音である原画像信号をより低減することができる(図4.9)．

[Step D2.] 2次元パターン復調

フィルタ処理画像を $N \times N$ 個のブロックに分割し，各ブロック($M \times M$ 画素， $M = R/N$)について埋め込みに用いた2つの2次元サインカーブに対応する周波数エネルギーをそれぞれ求める． $E_{h,v}^-$, $E_{h,v}^+$ を2つの2次元サインカーブのそれぞれに対応する周波数エネルギーとし，ブロック位置 (h, v) のブロックから得られる

図 4.10: 幾何変換に対する検出値 d の応答

検出値 $d_{h,v}$ を2つの周波数エネルギーの差,

$$d_{h,v} = E_{h,v}^+ - E_{h,v}^- \quad (4.9)$$

として求める. 全てのブロックに対して $d_{h,v}$ を求めることによって, $N \times N$ の正方行列である検出値行列 $D = \{d_{h,v}\}$ を得る.

この処理の基本的な考え方は, 符号”+”に対応する周波数エネルギーと, 符号”-”に対応する周波数エネルギーを求めて, それらの差によりブロック内にどちらの符号がどの程度支配的に埋め込まれているかを計測する, ということである. ノイズが全く無い状態であれば, 検出値 $d_{h,v}$ の符号は埋め込み時の埋め込み系列の項 t_i ($i = h + vN$) の符号に完全に一致し, かつ絶対値 $|d_{h,v}|$ は総じて大きな値となる. 逆に様々なノイズ要因, 例えば原画像信号による雑音, あるいは幾何補正後に残った幾何歪みなどが生じている場合, $d_{h,v}$ の符号と t_i の符号の一致の度合いは低くなるが, $|d_{h,v}|$ は比較的小さな値が多くなると考えられる. よって次節で述べる逆拡散処理に与える悪影響は最小限にとどまると考えられる. 図4.10に検出値が回転, スケーリング, 平行移動に対してどのような応答をするかについて実験した結果を示す. 回転は $\pm 10^\circ$, スケールは $0.6 \sim 1.5$, 平行移動量は $\pm M/3$ 程度

までの範囲なら検出値 d の符号がほぼ反転しないことが分かり、これより微少な幾何歪みに対して安定していることが分かる。なお、スケーリングについては縮小方向に比べ拡大方向の応答が安定しているという結果が得られた。これは縮小の場合は検出値の算出の際に隣接する他のブロックの影響を受けるが、拡大の場合は他のブロックの影響を受けないことによるものと考えられる。

最後に、 D の各要素 $d_{h,v}$ に対して前節で求めた重み $w_{h,v}$ を各々乗じて重み付けを行う。

[Step D3.] スペクトル拡散復調

検出値行列 D の要素をラスタスキャン順に並べた一次元系列を $\{g_i\}$ ($i = 0 \dots N^2 - 1$) とし、(4) 式の疑似ランダム置換を用いて

$$h_{o_i} = g_i \quad (i = 0 \dots N^2 - 1) \quad (4.10)$$

のように要素の並びを逆置換によりデスクランブルして $\{h_i\}$ を得る。次に、 $\{h_i\}$ の長さ $l = N^2/t$ の部分列を

$$x_i^{(j)} = h_{i+jl} \quad (i = 0 \dots l - 1) \quad (4.11)$$

のようにして得る。 $\{x_i^{(j)}\}$ は (1) 式の c_j の並びの区間を $\{h_i\}$ から抜き出した系列である。さらに $\{x_i^{(j)}\}$ を平均 0, 分散 1 となるように正規化して、検出対象系列とする。そして、3.2.3 節と同じ疑似乱数列 $\{r_i^{(j)}\}$ を用意し、逆拡散演算により各検出ビット値 c'_j ($j = 0 \dots n - 1$) を求める。ビット位置 j に対応する相関値 ρ_j を

$$\rho_j = \sum_{i=0}^{l-1} x_i^{(j)} r_i^{(j)} \quad (4.12)$$

のようにして求め、検出ビット値 c'_j を

$$c'_j = \begin{cases} 0 & , \text{ if } \rho_j < 0 \\ 1 & , \text{ if } \rho_j \geq 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

のようにして決定する。このスペクトル拡散復調により、加法的雑音への対応を図る [73]。

[Step D4.] 誤り訂正/検出復号

前節で求めた検出ビット列 $\{c'_j\}$ を検出した符号語 $Code'$ とみなし、 $Code'$ に対して誤り訂正および検出復号処理を行う。この処理により訂正可能な誤りは正し

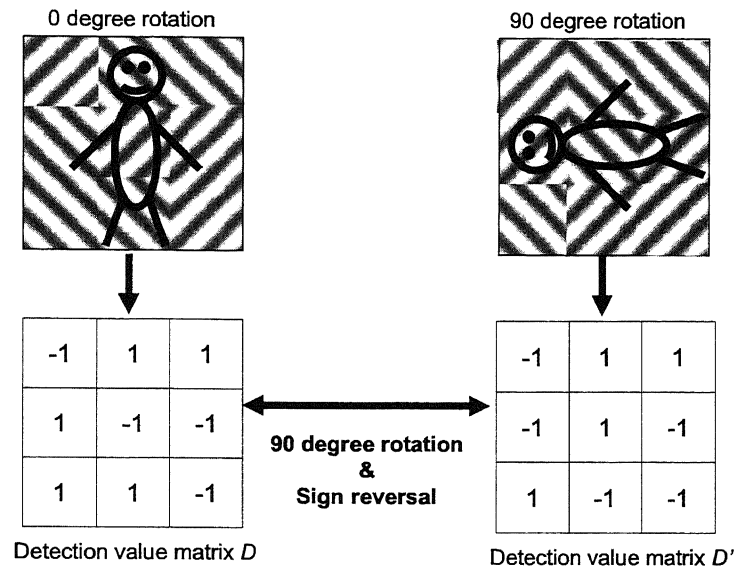


図 4.11: 画像の 90 度回転と検出値行列の関係

く訂正され、 k -bit の透かし情報 ID' を復号できる。また、誤りを検出した場合は電子透かしの検出に失敗したとして処理を終える。

しかし誤り検出能力を越える誤りを含む検出符号語 $Code'$ の場合、誤訂正によって「誤った透かし情報であるにも関わらず正しく訂正できた」として、埋め込んだ ID と異なる ID' を出力してしまう恐れがある。この問題については 3.5 節で詳しく述べる。

90 度毎回転対応処理

前節までで述べた検出方法では、画像の 90 度毎回転変換因子に対する対応を行っていない。本節ではこの問題に対応するための改良について説明する。

透かしの埋め込まれた画像が 90 度回転した場合を考えると、ブロックの並びも当然 90 度回転する。それと同時に 90 度の回転により、埋め込みに用いた 2 次元サインカーブの向きが逆転する。このことから、図 4.11 のように 90 度回転している検出対象画像を入力し、Step D2. までの処理を行って検出値行列 D' を求めると、これは 0 度回転の検出対象画像から得られる検出値行列 D と比べて、要素の並びが 90 度回転し、かつ全ての要素の符号が反転したものとなる。270 度についても 90 度の場合と同様である。180 度回転している場合は符号は反転しない。

そこで、まず入力された画像に対して Step D2. までの処理を行い検出値行列 D を求め、次に D を 90 度、180 度、270 度回転し、して得られる行列 D_{90° 、 D_{180° 、

D_{270° を生成する．この際， D_{90° および D_{270° については全ての要素の符号を反転させておく．

そして，この4行列の各々に対して Step D3. の処理を行う．4 行列に対して，3.5 節で述べる検出信頼度指標値 ρ を求め， ρ が最大値をとる時の検出符号語 $Code'$ を採用し，誤り訂正/検出復号を行い検出透かし情報 ID' を出力する．

上記の処理により，検出値行列の並べ替えと，Step D3. の処理を3回余計に行うことによる処理量の増加が生じる．しかし，例えば Step D2. 以降の処理を4回繰り返すといった単純な方法に比べれば，処理の増加量を低く抑えることができる．これは埋め込みパターンが90度回転対称の幾何学形状を持つおかげである．4章に示す実験結果で，各処理ステップの処理時間について比較し，本節で説明した90度毎回転対応処理が効率的であることが明らかにする．

4.3.5 電子透かし検出の信頼度

一般に電子透かし技術における重要な要件として，電子透かし検出処理において検出した透かし情報の確からしさを正しく評価することで，

A. False Positive error 「電子透かしが埋め込まれていない画像にもかかわらず検出が成功したと出力する」，あるいは，

B. Message error 「埋め込んだ情報と異なる透かし情報にも関わらず検出が成功したと出力する」

といった間違いの起こる確率を低く抑えることが求められている [38, 4, 6]．この要件に対しては，検出した透かし情報の確からしさを表す検出信頼度指標値を導入し，要件の充足を図る．

False Positive error に対する信頼性評価

(16) 式の ρ_j から得られる系列

$$y_j = \frac{1}{\sqrt{l}} \sum_{i=0}^{l-1} x_i^{(j)} r_i^{(j)} = \frac{1}{\sqrt{l}} \rho_j \quad (4.14)$$

($j = 0 \dots n-1$) について考える．今，帰無仮説

H_0 : 「 $\{x_i^{(j)}\}$ と $\{r_i^{(j)}\}$ は独立である」

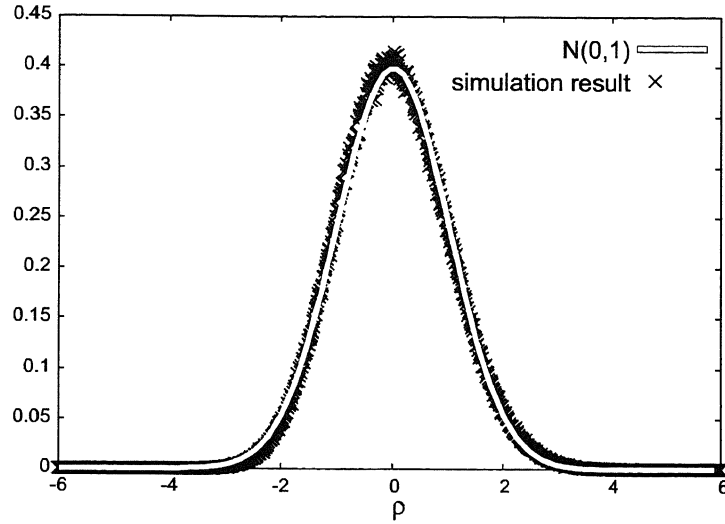


図 4.12: 透かしなしの場合の ρ の分布のシミュレーション結果 (白線は $N(0,1)$)

を立てると, l が十分大きければ, 中心極限定理により y_j は標準正規分布 $N(0,1)$ に従う確率変数であると近似できる. 次に, $z_j = |y_j|$ で得られる系列 $\{z_j\}$ ($j = 0 \dots n-1$) について考える. z_j の平均を μ_z , 分散 σ_z^2 とすれば,

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{n}\sigma_z} \sum_{j=0}^{n-1} (z_j - \mu_z) \quad (4.15)$$

は, n が十分大きければ, 再び中心極限定理により $N(0,1)$ に従う確率変数であると近似できる. 実際には $\mu_z = \sqrt{2/\pi}$, $\sigma_z^2 = 1 - 2/\pi$ が計算により確かめられるので, ρ の計算を容易に実装することができる. 透かしなしの場合の ρ の分布をシミュレーションによって得た結果を図 4.12 に示す ($l = n = 32$ の場合). 上記の議論どおり $N(0,1)$ に近似できることが分かる.

ρ が $N(0,1)$ の分布から大きく外れた値を取る場合, 帰無仮説 H_0 が棄却され, 二つの系列には相関がある, すなわち電子透かしが埋め込まれていることが定量的に検定できる. この ρ を検出信頼度指標値とする. ρ に対する False Positive rate は,

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\rho}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (4.16)$$

となる. 実装時には, サービス品質上許容できる $P_A = \varepsilon$ としたときの $\rho = T_{\rho}^{(\varepsilon)}$ を予め閾値として計算しておき, ρ に対する閾値判定を行えば良い.

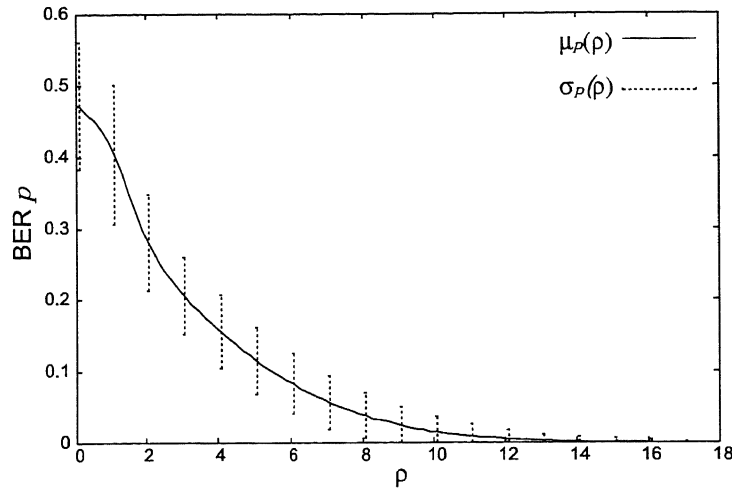


図 4.13: ρ に対する平均 BER $\mu_p(\rho)$, 標準偏差 $\sigma_p(\rho)$ のシミュレーション結果

Message error に対する信頼性評価

Message Error については, 検出信号の劣化度合いを計測するという点で False Positive の場合よりも議論が難しい. まず, シミュレーションによって劣化度合いがどうなるか計測を行った. $n = 32$ bit の場合の ρ に対する平均 Bit Error Rate $\mu_p(\rho)$ および標準偏差 $\sigma_p(\rho)$ のシミュレーション結果について図 4.14 に示す. ρ が透かし信号の存在性を表す指標であったことを考えれば, $\mu_p(\rho)$ はグラフのように ρ に対して単調減少であると考えられる. ρ に対する BER p の分布が確率密度関数 $f_p(p)$ で与えられるとする.

次に Step E1. および Step D4. で用いた誤り訂正/検出符号の正復号確率 P_C , 誤り検出確率 P_D , 誤訂正確率 P_E (誤りを見逃し, 誤った情報を正しい結果として間違える確率) を考える ($1 = P_C + P_D + P_E$). 一般にこれらの確率は BER p によって定まる. 今, BER p の時に誤訂正が起きる確率 $P_E(p)$ と, $f_p(p)$ を用いることにより, ρ を与えたときの Message error rate P_B は

$$P_B = \int_{-\infty}^{\infty} P_E(p) f_p(p) dp \quad (4.17)$$

で求めることができる.

誤り訂正/検出符号として (31+1,16) 拡大 BCH 符号 (2 重ビット誤り訂正可能) を用いた場合の $P_C(p)$, $P_D(p)$, $P_E(p)$ を図 4.14 に示す [77, 78]. また, シミュレーションにより求めた $f_p(p)$ とこの符号の $P_E(p)$ を用いて (21) 式により求めた ρ に対する P_B を図 4.15 に示す. 今, サービス品質上許容できる P_B の上限値を δ とすれば, $P_B = \delta$ となるときの $\rho = T_\rho^{(\delta)}$ を閾値として, ρ に対して閾値判定を行うことで,

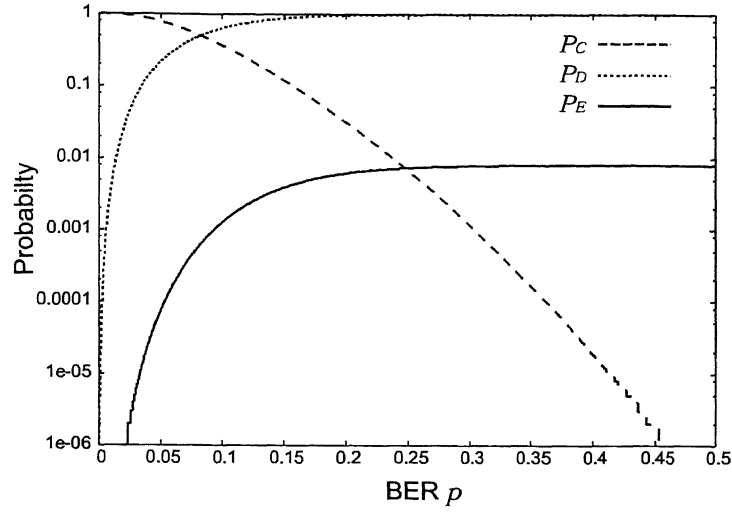


図 4.14: (31+1,16) 拡大 BCH 符号 (2 重ビット誤り訂正) の P_C, P_D, P_E

品質を保証することが可能となる。 $\delta = 10^{-3}$ と設定した場合、この符号については図 4.15 のグラフより、 $T_\rho^{(\delta)} \simeq 6.2$ を閾値とすれば良いことが分かる。

以上の議論により、Message Error rate についても、 ρ を用いて定量的に評価可能となる。なお、 $T_\rho^{(\delta)} = 6.2$ を False positive に対する閾値として適用した場合 $\varepsilon \simeq 2.82 \times 10^{-10}$ であり、 $T_\rho^{(\delta)}$ は ε に対してはより厳しい基準であると言える。そこで、もう少し緩い基準の ε に対応する閾値 $T_\rho^{(\varepsilon)}$ ($T_\rho^{(\varepsilon)} < T_\rho^{(\delta)}$) を用いれば、2つの閾値を用いて

- (a) 「電子透かしが存在しない」 ($\rho < T_\rho^{(\varepsilon)}$)
- (b) 「電子透かしは存在するが検出結果に誤りがある可能性がある」 ($T_\rho^{(\varepsilon)} \leq \rho < T_\rho^{(\delta)}$)
- (c) 「電子透かしを正しく検出」 ($\rho \geq T_\rho^{(\delta)}$)

の3つ検出信頼度ステータスを得ることができる。(b) のケースを用いて利用者にリトライを促すようなユーザインタフェースを実現することが可能である。

4.4 実験結果

提案方式の有効性を確認するため、本方式を i-appli に実装して各種実験を行った。i-appli は整数演算しかできないという実装上の制約がある [75]。しかし以上で述べた検出処理のほとんどは、画素値など整数の加減算および乗算で構成されて

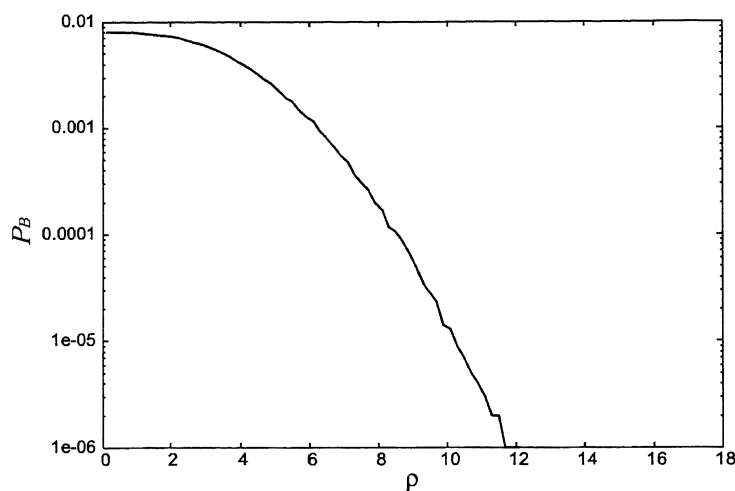
図 4.15: ρ に対する Message Error rate P_B

表 4.1: 処理速度

| Step | i-appli | PC |
|-------------------------------|-----------|-------------|
| D0. Quadrangle detection | 82 msec. | 2.02 msec. |
| Homography correction | 452 msec. | 6.43 msec. |
| D1. Preprocessing filtering | 39 msec. | 0.21 msec. |
| D2. 2D pattern demodulation | 108 msec. | 0.89 msec. |
| D3. SS demodulation (4 times) | 16 msec. | 0.14 msec. |
| D4. ECC/EDC decoding | 1 msec. | 0.001 msec. |
| Total | 698 msec. | 9.691 msec. |

いる。また、検出信頼度指標算出など、ごく一部の計算については浮動小数点演算を行う必要があるが、これらの部分は固定小数点化コーディングによって問題なく実装できる。実験時には、誤り訂正/検出符号として $(31+1,16)$ 拡大 BCH 符号 (2重ビット誤り訂正可能) を用いた。これにより透かし情報長 $k = 16$ bit, 符号長 $n = 32$ bit となる。また、3.2.5 節で述べた適応的埋め込み方法については文献 [5] で述べられている方法を用いた。カメラ付き携帯電話機による撮影画像の解像度は 288×352 画素である。

4.4.1 処理速度

表 4.1 に i-appli (NTT ドコモ社の F505i を実験端末として用いた) と、参考のために PC (Pentium4 1.6GHz, C 言語で実装) による処理時間を示す。この中で、枠線認識による射影歪み補正処理時間は一定値ではないため平均値であるが、補正後

表 4.2: 埋め込み強度値と PSNR

| | α | β | γ |
|----------|----------|---------|----------|
| Lena | 39.071 | 37.762 | 36.664 |
| Baboon | 33.238 | 32.011 | 30.932 |
| Sailboat | 37.086 | 35.820 | 34.728 |

の電子透かし検出処理時間は常に一定である。この結果から、補正画像からの電子透かし検出部分の処理時間の合計が 164 msec., トータルの処理時間は 698 msec. であり, 2.1 節の高速性要件を充足するものであることが分かる。また, 3.4.6 節で述べた 90 度毎回転対応により逆拡散演算を 4 回繰り返しているにもかかわらず, Step D3. の処理時間は 16 msec. であり, 提案方式の 90 度毎回転対応処理が効率的であることも分かる。

4.4.2 ロバスト性

矩形検出のロバスト性

隣接する文字や他の画像といったノイズに対する矩形検出のロバスト性を評価するために, 図 4.16 に示す 3 種類の印刷物を用いて実験を行った。これら印刷物上の画像には後述する埋め込み強度 γ で電子透かしを埋め込んだ。被験者には, 検出対象画像全体が撮影フレームに収まるように撮影することのみを指示した。電子透かし検出が成功した割合は 97% であり, 図 4.16 の 3 種のレイアウト間で顕著な差は見られなかった。この実験による検出結果画像例を図 4.17 に示す。図 4.17(a) および (b) は電子透かし検出が成功した例, (c) および (d) は電子透かし検出失敗の例である。検出失敗理由は手ぶれ等によるボケや, 極端な撮影角度による歪みによるものであった。電子透かし検出失敗となった撮影画像について目視で確認した結果, これらの画像では矩形検出は成功していたことが分かった。すなわち, 矩形検出は十分にロバストであると言える。

電子透かし検出のロバスト性

提案方式のロバスト性を評価するために, 評価画像 2 種 (Lena, Baboon), 埋め込み強度 a を 3 通り ($\alpha = 3.58, \beta = 4.70, \gamma = 6.71$), 枠付き電子透かし埋め込み画像をカラープリンタで印刷してアナログ出力する際の画像の実寸サイズ 2 通り (5cm 四方, 25cm 四方) について電子透かし検出実験を行った。なお, 実験には処

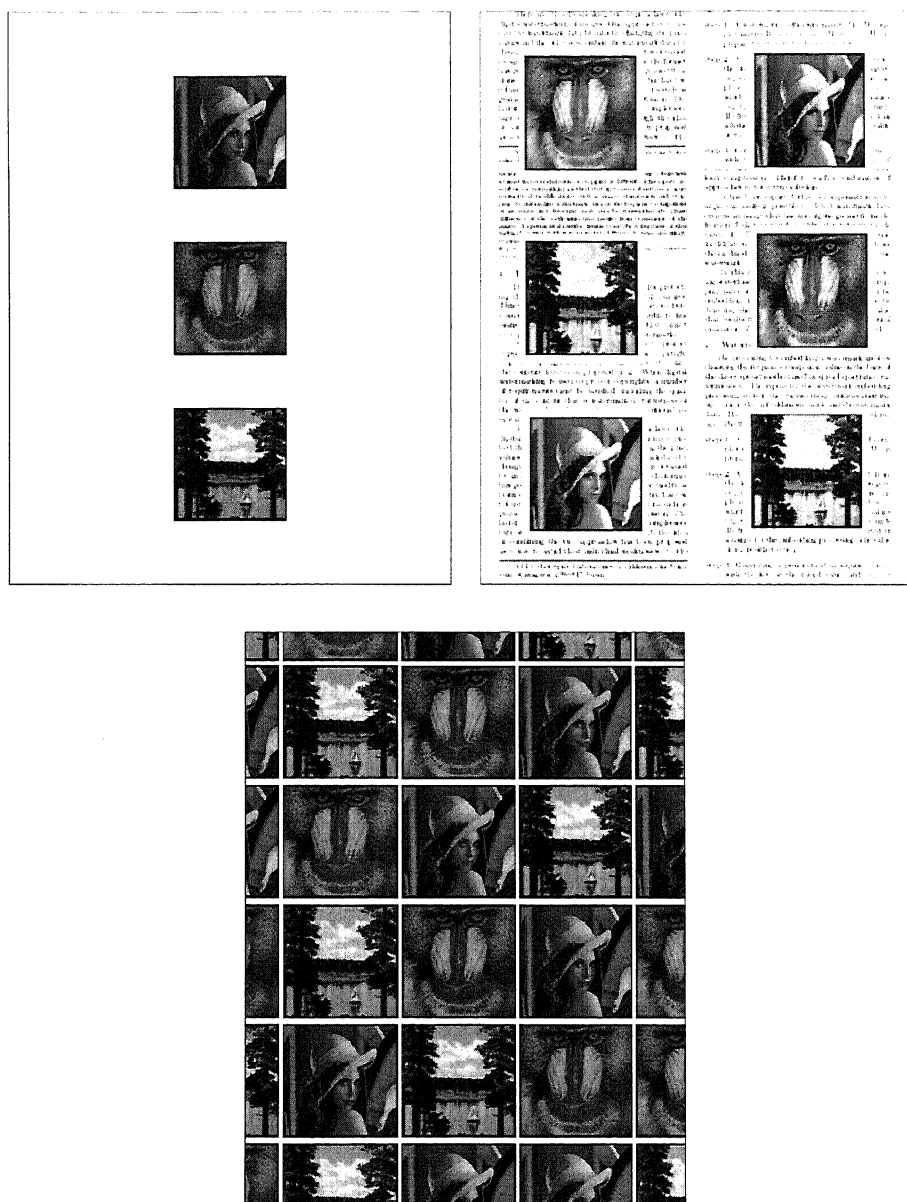


図 4.16: 矩形検出のロバスト性評価実験で用いた印刷物 (A4 サイズ (21 × 29 cm))

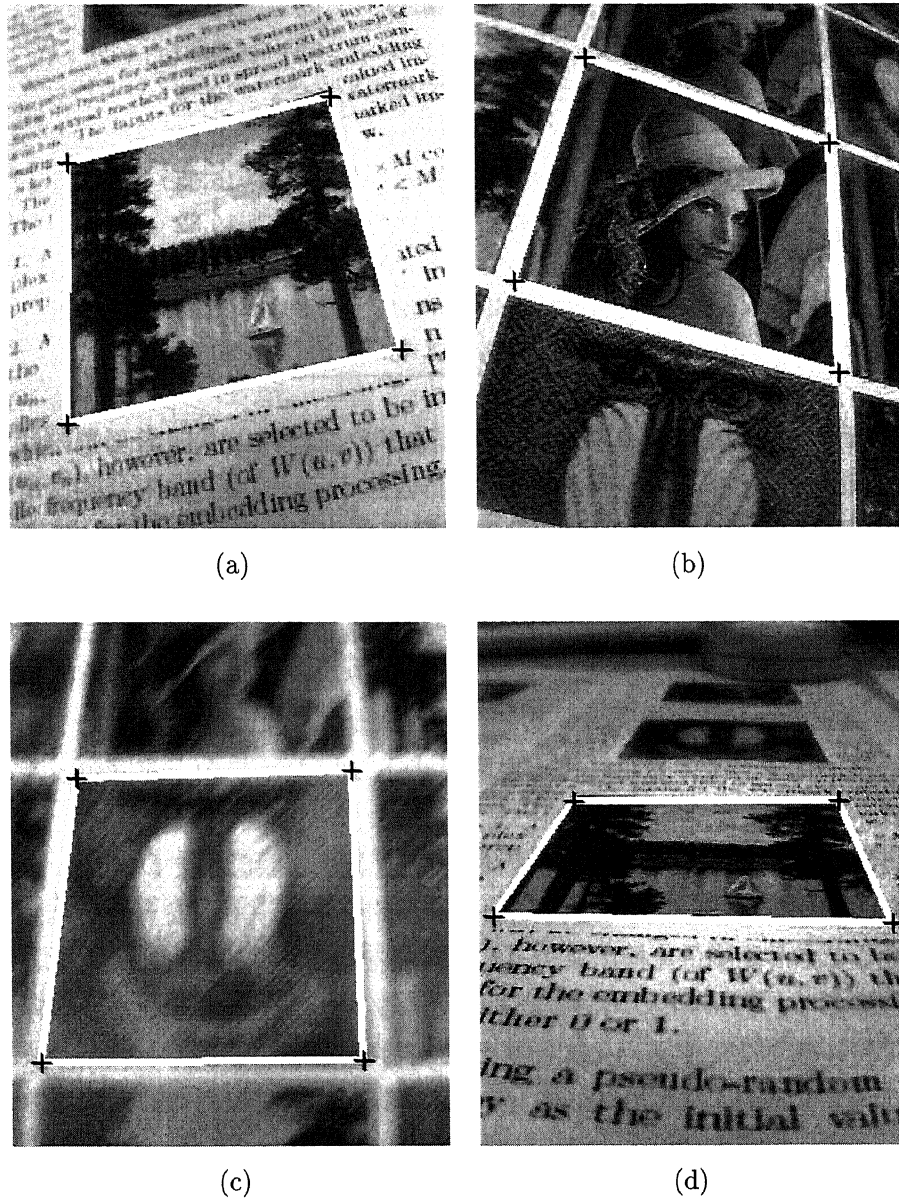


図 4.17: 矩形検出結果例: (a)(b): 矩形検出および電子透かし検出の両方とも成功, (c)(d): 矩形検出は成功したが電子透かし検出は失敗

表 4.3: 検出結果 (撮影方法を特に指示しなかった場合)

| | a | 5 cm×5 cm | | 25 cm×25 cm | |
|----------|----------|-----------|--------------|-------------|--------------|
| | | success | $\bar{\rho}$ | success | $\bar{\rho}$ |
| Lena | α | 81% | 8.89 | 93% | 12.87 |
| | β | 89% | 11.37 | 99% | 15.50 |
| | γ | 98% | 15.08 | 100% | 19.19 |
| Baboon | α | 90% | 11.33 | 96% | 12.43 |
| | β | 94% | 14.89 | 100% | 16.53 |
| | γ | 99% | 17.53 | 100% | 19.32 |
| Sailboat | α | 48% | 6.63 | 94% | 10.14 |
| | β | 84% | 8.46 | 95% | 12.63 |
| | γ | 93% | 11.46 | 100% | 16.61 |

理速度評価時と同じく F505i 端末を用い、カメラ撮影による撮影画像のサイズは 288×352 画素である。

表 4.2 に原画像と電子透かし埋め込み画像間の PSNR を示す。また図 4.18 に埋め込み強度 $a = \beta$ の場合の枠付き画像を示す。画像によって同一埋め込み強度でも PSNR が異なっているのは、3.2.5 節で述べた適応的埋め込み処理によるものである。本実験では、画像の輝度成分への埋め込みを行った。一部の画像で透かしの模様がやや知覚されうる部分があったが、輝度成分より知覚感度の低い色成分への埋め込みによって、さらに画質と耐性のトレードオフ向上が図れるものと考ええる [27]。

次に実際に印刷された画像をカメラ付携帯電話機で撮影してロバスト性の実験を行った。検出成功/失敗の判定基準は、 ρ が閾値 $T_{\rho}^{(d)} = 6.2$ 以上であり、かつ誤り検出をしなかった場合を検出成功として評価を行った。被験者に対して、枠線認識の条件である「撮影画像中に枠全体が収まるように注意すること」のみを伝えて、他に特に指示をせず適当に撮影させた場合の検出結果を表 4.3 に示す。また、図 4.17 で見たとおり、手振れによる motion blur が生じていたり、射影歪みの程度が大きい場合に検出を失敗しやすいことが分かる。

次に、被験者に対して「手振れに注意し、射影歪みが生じにくいようにできるだけ正面から撮影すること」を指示をした場合の検出結果を表 4.4 に示す。利用者に注意を促すことでかなり検出精度が向上することが分かる。

また、5cm 四方と 25cm 四方を比較すると、25cm 四方の方が総じて検出成功率が高い。これは 5cm 四方の画像をカメラで撮影する際には近接撮影となり、focus が合いづらくピンぼけが生じるためだと考えられる。

表 4.4: 検出結果 (正面から撮影するよう指示をした場合)

| | | 5 cm×5 cm | | 25 cm×25 cm | |
|----------|----------|-----------|--------------|-------------|--------------|
| | a | success | $\bar{\rho}$ | success | $\bar{\rho}$ |
| Lena | α | 100% | 10.27 | 100% | 16.36 |
| | β | 100% | 14.69 | 100% | 19.85 |
| | γ | 100% | 18.34 | 100% | 22.15 |
| Baboon | α | 100% | 13.65 | 100% | 14.43 |
| | β | 100% | 17.23 | 100% | 17.63 |
| | γ | 100% | 20.73 | 100% | 20.65 |
| Sailboat | α | 90% | 7.95 | 100% | 12.92 |
| | β | 100% | 9.57 | 100% | 15.44 |
| | γ | 100% | 15.03 | 100% | 19.55 |

以上の結果から、例えば透かし強度 $a = \beta$ を 5cm 四方の画像に対して適用した時に、特に意識せずに撮影すれば、Lena については 11%, Baboon については 5% 程度の確率で検出失敗するが、できるだけ正面から撮影することを意識してリトライすれば、ほぼ 100% の検出成功率が得られることになる。

なお上記実験中の総試行回数 1440 回のうち、3.5 節の type B. の false positive は一度も起きなかった。

4.5 本章のまとめ

第3章で示した C/S 方式における通信処理に伴うコスト問題を本質的に解決するため、カメラ付き携帯電話機上でスタンドアロン処理で高速に検出処理が可能な静止画電子透かし方式について示した。提案方式は画像の縁を利用して撮影角度によって生じる幾何歪みの補正をすることで空間同期をとり、さらに安定した特性を有する 2 次元ブロックパターン変調を用いることに微小な幾何歪みに対処し、スペクトラム拡散変調によりノイズに対するロバスト性を実現した。さらに、実サービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法 (False Positive, Message Error) についても示した。実機に実装して行った評価実験によって、提案手法は携帯電話機上の Java アプリケーションとして実装した場合でも、700 msec. 程度で電子透かし検出処理を完了することができ、また、十分なロバスト性を有することを確認できた。

今後の課題としては、埋め込み透かし情報量の拡大、ロバスト性の画像依存性や、商用印刷・CRT・LCD 画面出力などアナログ出力方法依存性の分析、および

それらの結果として，出力方法に応じた視覚的劣化度合いと電子透かしのロバスト性を考慮した適応的埋め込み処理の高度化が挙げられる．また，今回は処理速度の観点から枠線を用いた補正により幾何歪み耐性を実現したが，枠付き画像全体を撮影しなければならないという制約がある．部分的な撮影にも対応しうる幾何歪みへの対応方法も今後の重要な課題として挙げられる．

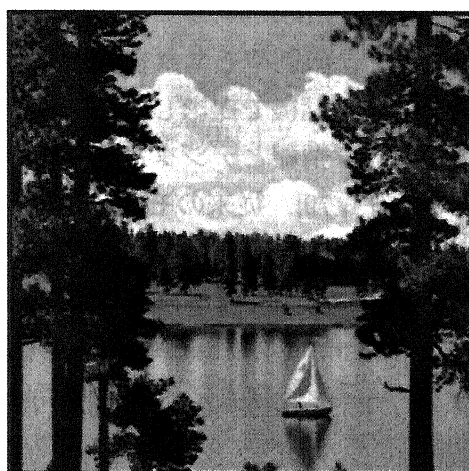
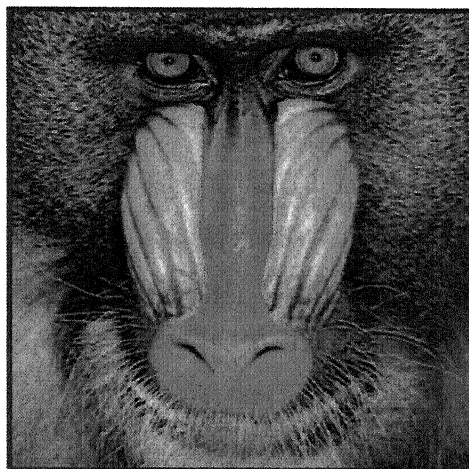


図 4.18: 埋め込み強度 $a = \beta$ の枠付き Embedded images (左: Lena, 右: Baboon)

第5章 カメラ付携帯端末向けの高速な動画電子透かし技術：フレーム間差分法

本章および次章では、対象を動画へと変え、ディスプレイ上で再生されている動画から、カメラ付き携帯電話機を用いてリアルタイムに検出処理可能な高速な動画向け電子透かし方式について提案する。提案方式は、第4章の方式と同じくキャプチャフレーム中の矩形領域をリアルタイムに検出・追跡することで、フリーハンド撮影によって刻々と撮影角度による幾何歪みに対処して空間同期を実現する。電子透かしアルゴリズムとしては、まず、本章ではプロトタイプとして、連続してキャプチャされるキャプチャビデオフレームの時間差分を利用する手法を提案する。ビデオフレームの時間差分をとることで原画成分を抑圧してS/N比を改善することにより、スペクトラム拡散された電子透かし信号をロバストに可能である。さらに第4章と同じく、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験により、画面表示された動画にカメラ付き携帯電話機をかざすことで、リアルタイムにかつロバストに検出可能であることを確認する。

5.1 はじめに

電子透かし技術の応用として、印刷やモニタ表示などでアナログ出力された透かし入り画像をカメラ付き携帯電話機で撮影して電子透かし検出を行ない、検出した透かし情報を用いてアナログ情報とデジタル情報を連携させるモバイル電子透かし技術が提案されている[74, 79]。従来のモバイル電子透かし技術は、印刷物などの静止画像を一枚撮影して検出処理を行なう静止画向けのものであった。

モバイル電子透かしの概念は静止画だけに限定されず、映像にも拡張して考えることができる。すなわち、TV画面で再生されているTV番組やDVDコンテンツ、あるいは街頭の大型ディスプレイなどに表示されている広告映像などにカメラを向けることで、詳細情報やオンラインショッピングサイトなどといった再生映像シーンに関連する情報サービスを楽しむことができるようになる(図5.1)。

映像には一般にMPEG-2などの強力な圧縮符号化が施されるため、電子透かし

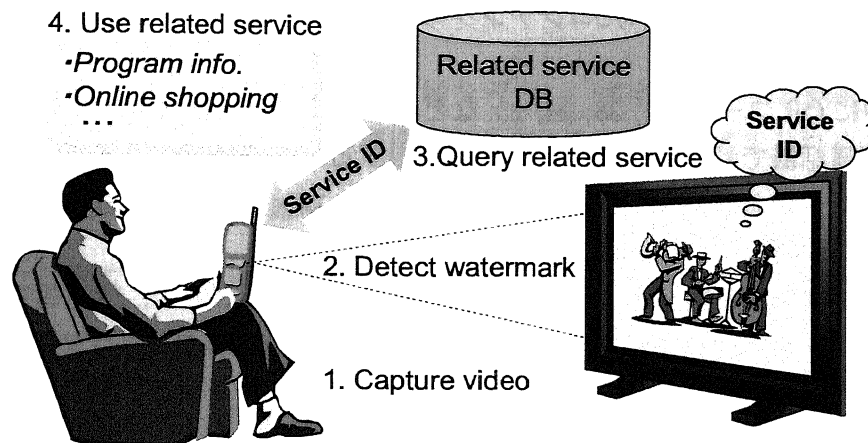


図 5.1: 動画向けモバイル電子透かし

技術には高いロバスト性が求められる。しかしながら、静止画電子透かし手法では映像の時間方向の特性を利用しないためロバスト性が不十分である。そのため、携帯電話機上で検出処理可能な高速な動画向け電子透かし技術が必要となる。

本章では、技術の位置付けを明らかにして要件定義を行なった上で、リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし方式の検討を行ない、さらに実機上に実装して行った評価実験により実現可能性を確認する。

5.2 関連技術

図 5.1 に示した動画向けモバイル電子透かし技術の利用シーンでは、動画を視聴している利用者が視聴中のコンテンツに関連する情報を取得する際、カメラ付き携帯電話機を表示画面に向けてビデオキャプチャしリアルタイムに電子透かしを検出する。検出したサービス ID 情報を関連情報提供サーバに送信し、対応する関連情報を取得して様々なサービスを利用することができる。

5.2.1 電子透かし以外の手法

動画向けモバイル電子透かし技術と同様の機能を実現可能と思われるいくつかの関連技術について考察する。

放送中の TV 番組に関する情報を取得したい場合に、現在時刻 (と放送チャンネル情報) をサーバに送信し、サーバ側で番組表に基づいて視聴シーンを特定して関連する情報を提供するタイムスタンプ手法 [29] では、PVR (Personal Video Recorder) などに録画したコンテンツをタイムシフトして再生している場合や、DVD などの

パッケージ媒体に記録されたコンテンツの再生の場合に関連情報を得ることが不可能である。

映像中に QR コード [21, 23, 24, 25] などのバーコードを表示し、これをカメラ付き携帯電話機で読みとって関連情報を取得する手法では、コードパターンが表示画面上で一定の面積を一定時間占有するため、コンテンツの視聴の妨げとなるという問題がある。

ワンセグ放送などのデジタル放送のデータチャネルを用いて、放送番組の関連情報をチューナで受信する方法 [31] は、データチャネルを持つデジタル放送に対象が限定され、従来のアナログ放送、DVD などの蓄積メディア、屋外の公共ディスプレイ上の再生映像に関する関連情報を取得することが不可能である。

映像向け特徴量マッチング技術を利用する方法 [34, 35, 36] は、映像に手を加える必要がない点で電子透かしアプローチよりも優れる。しかしマッチング結果の信頼性が比較的低い、マッチングをサーバで行うために通信を伴いレスポンスが遅い、絵柄が同じ映像を区別することができないという問題がある。最後の点について、例えば同一映像に対応付ける関連情報を、TV/DVD などメディアの違いに応じて異なるようにすることができなかつたり、関連情報取得のきっかけとなった映像媒体が広告料を得る pay-per-click 型広告ビジネスが実現不可能であるなど、適用範囲が狭くなるという問題がある。

以上の関連技術と比較して、本章で検討する動画向けモバイル電子透かしアプローチの利点は以下になる：映像自体に関連情報をリンクするので再生タイミングやメディアによらない。映像中に関連情報を不可視に埋め込むことにより視聴の妨げとならない。アナログ放送など既存メディアに対応し、また既存のカメラ付き携帯電話機で実現できる。携帯電話機上で検出処理が完結するのでレスポンスが速い。検出結果の信頼性が高い。映像コンテンツとは独立に ID を付与できコンテンツを個体化可能である。

5.2.2 従来の電子透かし技術

電子透かし技術動向に眼を向けると、静止画向けモバイル電子透かし手法 [79] は先に述べた通り動画処理ではないために時間方向特性を利用できずロバスト性が低い。カメラ撮影に対する耐性を有する映像向け手法 [19, 18, 17, 80] は著作権保護向けに検討されたものであるため、検出に原画像が必要であったり、検出に必要なキャプチャ映像が数分程度必要であったり、PC 上での処理を前提としており、ウェーブレット変換など直交変換を利用するなど処理量が多いため、モバイル電子透かしには適さない。

5.3 要件定義

以上の利用シーンや関連技術との比較を考慮し、本章で検討する動画向けモバイル電子透かし方式に求められる要件は以下のようになると考えられる：

- (a) 画質劣化が視聴の妨げにならないこと
- (b) 様々な再生・撮影条件で検出可能なこと
- (c) 撮影を開始してから短時間で検出成功すること
- (d) 検出試行に対する応答の遅延が少ないこと
- (e) 検出した透かし情報の信頼性が保証されていること

電子透かしはコンテンツデータの変更により別の情報を埋め込む技術であるため、コンテンツの劣化が必然である。そこで要件 (a) では埋め込みによる画質劣化が知覚されないことを要求する。

要件 (b)～(d) は利便性に関する要件である。要件 (b) について、例えば検出のためにカメラを三脚に固定することが必要では、関連技術と比較して利便性が低いと言わざるを得ない。また、映像に通常用いられる圧縮符号化に対する耐性も必要である。要件 (c) については、利便性の観点から携帯電話機スタンドアロン処理を前提とした上で、短時間で結果が得られるような高速・高耐性な方式を要求する。許容可能な応答時間については、次の要件 (d) においてリアルタイムフィードバックを行う点も踏まえ、Shneiderman の示したガイドライン [76] における「通常のタスク」に求められる応答時間の基準を採用し、検出を開始してから検出結果を得るまでの時間が 2～4 秒以内となることがユーザインタフェース上の要件として適切であると考え。要件 (d) については、検出状況をリアルタイムにフィードバックすることによる操作性向上を期待するものであり [76, 81]、検出処理には高いスループットが要求される。

要件 (e) は、実サービスへの展開には必須の要件である。これが満たされないと、例えば本来埋め込まれている透かし情報とは異なる情報を誤検出してしまい、全く無関係な関連情報を提示してしまうといった問題が生じてしまう。

検討の前提となる携帯電話機上のアプリケーションプラットフォームとしては、第4章で検討した Java ベースの環境 (i アプリ) では動画キャプチャを行いながらリアルタイム画像処理を行うインタフェースが利用できないため、本章では現在携帯電話機に広く採用されている QR コードリーダーのような、ネイティブアプリケーションを想定することとする。

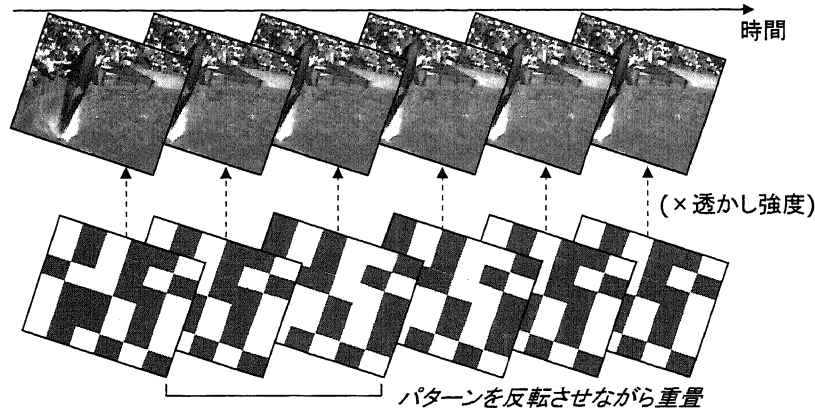


図 5.2: 映像フレームへの透かしパターン重畳

5.4 提案方式

前節で示した要件を満たすために、携帯電話機向けの高速な静止画電子透かし方式 [79] を元に以下のような方式を検討した。

5.4.1 電子透かし埋め込み

k -bit の透かし情報を誤り訂正/検出符号化し、 N -bit の符号語 $\vec{c} = \{-1, 1\}^N$ を得る (ビット値を ± 1 の極性とみなす)。次に N 種類の長さ M の擬似乱数列 $\vec{\xi}^{(n)} = (\xi_1^{(n)} \xi_2^{(n)} \dots \xi_M^{(n)})$ を生成し、次のようにして各 c_n をスペクトラム拡散変調する。

$$\vec{\zeta}^{(n)} = c_n \vec{\xi}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (5.1)$$

次に、 NM 個の $\zeta_m^{(n)}$ を二次元に配置し、 NM 個のブロックから構成される入力映像のフレーム解像度と同じ大きさの透かしパターンを生成する。

最後に、生成した透かしパターンを映像の劣化/電子透かし耐性のバランスを制御する透かし強度で増幅したのち、入力映像の各フレームに対して重畳して埋め込みを行なう。重畳の際には、透かしパターンの正負を予め定めた時間周期で反転させながら、入力映像の各フレームに重畳を行なうようにする (図 5.2)。この反転処理によって、次節で述べるように電子透かしの検出性能を大幅に向上させることが可能となる。

5.4.2 電子透かし検出

以上のようにして電子透かしが埋め込まれた映像が、TV などの表示画面上で再生される。図 5.3 にカメラキャプチャからの電子透かし検出処理の流れを示す。以

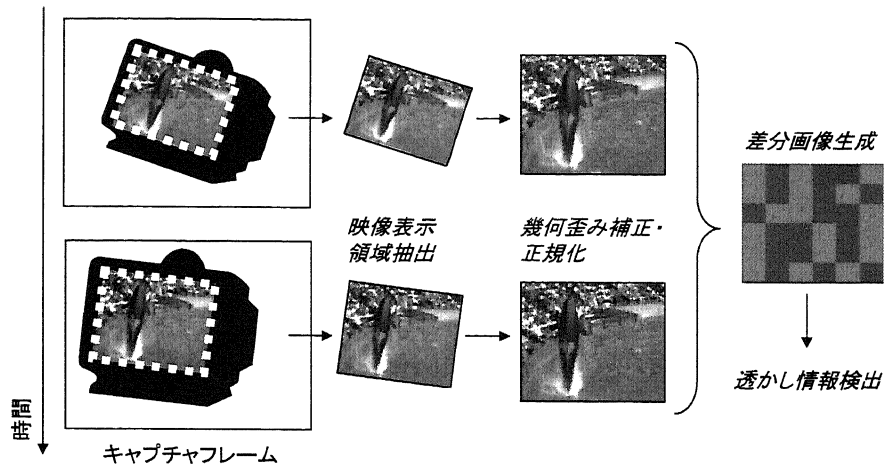


図 5.3: 電子透かし検出処理フロー

下で説明するように、再生映像を携帯電話機のカメラでビデオキャプチャしながらリアルタイムに電子透かし検出を行なう。全ての処理が携帯電話機上で実行されるため、処理の高速性が求められる。

フリーハンド撮影による幾何歪みの補正

カメラ付き携帯電話機によるビデオキャプチャで順次得られるキャプチャフレーム中の映像表示領域は、撮影角度による平面射影歪みで変形しており、さらにフリーハンド撮影によって歪み度合いが時間変化する。これに対処するため、各フレームごとに幾何補正を行う。具体的には、高速な矩形抽出手法である STA (Side Trace Algorithm) [72, 82] を用いて、各キャプチャフレーム中の矩形領域である映像表示領域を抽出する。ただし STA は、エッジ追跡に基づく矩形抽出手法であるため、表示画面と背景とのエッジが不明瞭な場合は映像に細い縁どりを付加する。抽出した映像表示領域を幾何補正し、正規化画像を各キャプチャフレームから取得する (図 5.3)。

正規化画像からの電子透かし検出

今回のキャプチャフレームから得られた正規化画像について、直前に得られた正規化画像との差分画像を生成する (図 5.3)。次に差分画像を MN 個のブロックに分割し、各ブロックの平均画素値を求めて要素数 MN の配列を得る。配列を 1 次元に並べ替えて埋め込み時の $\vec{c}^{(n)}$ に対応する系列 $\vec{\eta}^{(n)} (n = 1 \dots N)$ を得る。そ

して埋め込み時の擬似乱数列 $\vec{\xi}^{(n)}$ との内積

$$\rho_n = \vec{\eta}^{(n)} \cdot \vec{\xi}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (5.2)$$

を求め、検出ビット値 c'_n を次のようにスペクトラム拡散復調により得る.

$$c'_n = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho_n < 0 \\ 1 & \text{if } \rho_n \geq 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

最後に、検出情報 \vec{c}' に対して誤り訂正/検出復号を行ない、次節で述べる信頼度判定を行なって有意な透かし情報を検出したと判定した時に電子透かし検出成功とする.

以上の4.2.1節から4.2.2節の処理を電子透かしが検出成功するまで順次繰り返す.

文献2の方法を含むスペクトラム拡散変調などの加法的なアルゴリズムでは、透かし信号に対して原画成分が雑音として振舞う. そのため、原画像情報を用いなくて検出を行う場合、原画成分による非常に大きな雑音により、十分な耐性を得ることが困難である. しかし、動画像では一般に時間的に近接したフレーム間の相関が高いため、近接した2枚のフレーム画像の差分を求めれば原画成分を大きく抑圧することが可能となる[80]. さらに透かしパターンを反転させながら埋め込みを行なっていることから、2枚のフレームに埋め込まれている透かしパターンが反転しているとすれば(例えば反転周期をカメラキャプチャレートと合わせて、連続するキャプチャフレーム間で埋め込まれている透かしパターンが反転するように設定することによって)、差分画像中の原画成分が抑圧されるのみならず透かしパターンの振幅が倍に増幅され、S/N比の向上により電子透かしの耐性向上が期待できる.

また、従来電子透かし埋め込み/検出処理にはDCT(離散コサイン変換) 領域やDWT(離散ウェーブレット変換) 領域など周波数領域を利用する手法が多かったが、一般に画像の2次元直交変換は処理量が多いため、限られた計算処理能力しか持たない携帯電話機上で高速動作させるために、提案手法では直接画素領域からの検出を行うようにした.

なお、差分のタイミングによっては差分画像中の透かしパターンが本来のパターンの反転となることがある. 誤り訂正/検出符号としてBCH符号などの線形符号を用いた場合、ビット反転した符号語からビット反転した情報が正しく復号されてしまうため、検出透かし情報が正しく得られない恐れがある. この問題に対して、透かし情報中の1ビットをビット反転判定用のフラグビットとして利用し、検出透かし情報のビット反転を防ぐようにする.

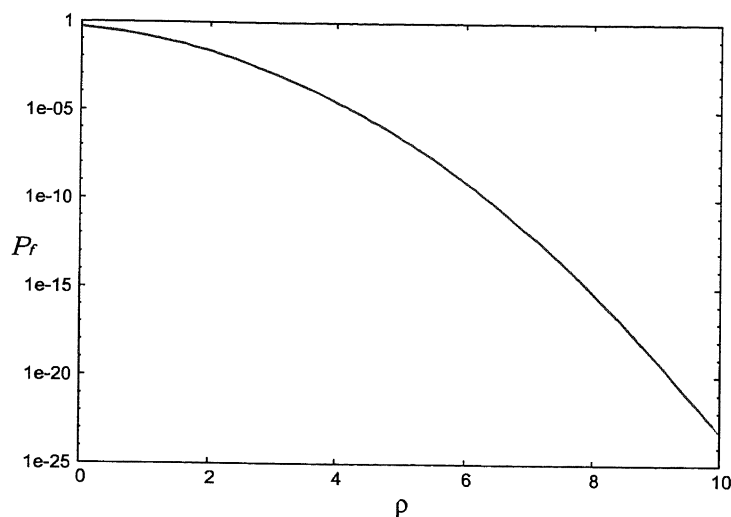


図 5.4: 1 回の検出試行における検出信頼度指標値 ρ に対する false positive rate P_f

5.5 電子透かし検出の信頼性評価

3 節で挙げた要件 (e) のために、電子透かし検出処理によって得られた透かし情報の信頼性を定量的に保証することを考える。電子透かし検出の信頼性上問題となるエラーは、false positive(電子透かしが埋め込まれていないものから検出成功してしまう誤り)、message error(埋め込まれている情報と異なる情報を検出成功してしまう誤り)に分類できる [6, 79]。電子透かしの検出処理時には、原映像信号、透かし情報、埋め込み強度が不明であるため、これらを用いずに検出結果の信頼性を評価しなければならない。

5.5.1 False Positive Error

議論を簡単にするため、スペクトラム拡散のための擬似乱数列 $\vec{\xi}^{(n)}$ ($n = 1 \dots N$) は、それぞれ各項が平均 0、分散 1 の分布に従うものとする。また、検出対象画像から得られる $\vec{\eta}^{(n)}$ を平均 0、分散 1 に正規化した上で、以下の議論を行う。式 (2) の ρ_n から得られる系列

$$y_n = \frac{1}{\sqrt{M}} \rho_n = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \eta_m^{(n)} \xi_m^{(n)} \quad (5.4)$$

($n = 1 \dots N$) について考える。今、帰無仮説

$$H_0: \text{「}\vec{\eta}^{(n)} \text{ と } \vec{\xi}^{(n)} \text{ は独立である」}$$

を立てると、 M が十分大きければ、中心極限定理により y_n は標準正規分布 $N(0,1)$ に従う確率変数であると近似できる。次に、 $z_n = |y_n|$ で得られる系列 $\{z_n\}$ ($n = 1 \dots N$) について考える。 z_n の平均を μ_z 、分散 σ_z^2 とすれば、

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{N}\sigma_z} \sum_{n=1}^N (z_n - \mu_z) \quad (5.5)$$

は、 N が十分大きければ、再び中心極限定理により $N(0,1)$ に従う確率変数であると近似できる。 ρ が $N(0,1)$ から大きく外れた値をとる場合、帰無仮説 H_0 が棄却され、二つの系列には相関がある、すなわち電子透かしが埋め込まれていることが定量的に検定できる。この ρ を検出信頼度指標値とする。差分画像からの1回の検出試行時の ρ に対する false positive rate P_f は、

$$P_f = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\rho}{\sqrt{2}} \right) \quad (5.6)$$

となる。図5.4に式(6)より得られる検出信頼度指標値 ρ に対する P_f のグラフを示す。式(5)において、 $\mu_z = \sqrt{2/\pi}$ 、 $\sigma_z^2 = 1 - 2/\pi$ が事前に求められるので、 ρ の計算を容易に実装することができる。実際の検出処理時には、サービス品質上許容できる $P_f = \varepsilon$ としたときの $\rho = \alpha$ を予め閾値として設定しておき、各検出試行ごとに得られる ρ に対する閾値判定を行うだけで良い。

提案方式では動画キャプチャからの検出試行を繰返し行なう。各検出試行は独立であるから、 L 回の繰返し検出試行における false positive rate P'_f は、

$$P'_f = 1 - (1 - P_f)^L \quad (5.7)$$

となる。後述する評価実験により、2秒間の検出試行回数は $L = 28$ である。これにより、例えば1試行に対する閾値 α を8.5とすると、 $P_f < 10^{-17}$ 、 $P'_f < 2.8 \times 10^{-16}$ を保証することが可能である。

5.5.2 Message Error

検出信頼度指標値 ρ に対する検出符号語 \vec{c} の BER (Bit Error Rate) は、 ρ が検出した電子透かしの信号強度とみなせるから、 ρ に対して単調減少である。 ρ に対する BER p の確率密度関数を $f_\rho(p)$ とする。誤り検出符号の誤り見逃し率は一般に BER p の関数 $P_e(p)$ である [77]。これらを用いると、1回の検出試行において指標値 ρ が得られた時の message error rate P_m は以下のように表せる。

$$P_m = \int_0^\infty P_e(p) f_\rho(p) dp \quad (5.8)$$

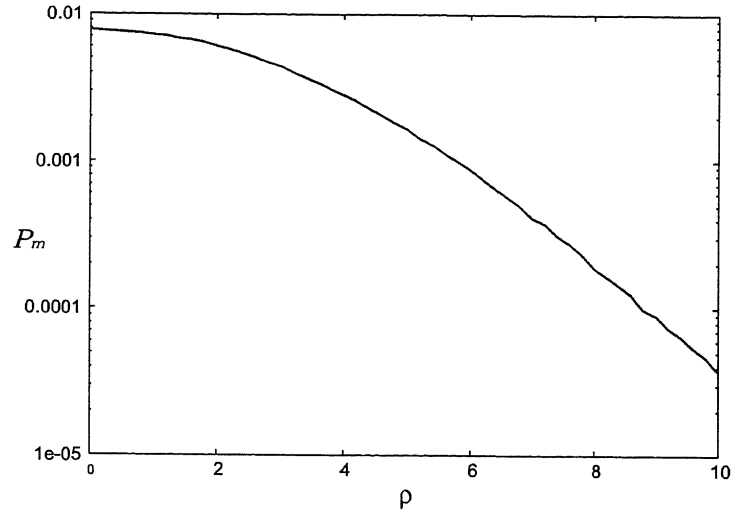


図 5.5: 1 回の検出試行における検出信頼度指標値 ρ に対する message error rate P_m

図 5.5 に式 (8) より得られる 1 回の検出試行あたりの ρ に対する message error rate P_m のグラフを示す。ただし誤り検出/訂正符号として (31+1,16) 拡大 BCH 符号 (2 重ビット誤り訂正) を用いた場合であり、 $f_\rho(p)$ はシミュレーションにより求めた値を用いた。false positive と同じく、サービス品質上許容できる $P_m = \delta$ としたときの $\rho = \beta$ を予め閾値として設定しておき、検出処理時は閾値判定をするだけで品質保証が可能である。

また、false positive と同様に、 L 回の繰返し検出試行における message error rate P'_m は、

$$P'_m = 1 - (1 - P_m)^L \quad (5.9)$$

となる。 $L = 28$ のとき、例えば 1 試行に対する閾値 β を 8.5 とすると、 $P_m < 10^{-4}$ 、 $P'_m < 2.8 \times 10^{-3}$ を保証することが可能である。

さらに、同一の閾値が message error よりも false positive に対してより厳しい基準となること、および false positive 評価が透かしの存在有無の評価であることに注目すれば、 P_f に対する閾値 α と P_m に対する閾値 β を、 $\alpha < \beta$ なる異なる値に設定することによって、

- (i) 「電子透かしが存在しない」 ($\rho < \alpha$)
- (ii) 「電子透かしは存在するが検出結果に誤りがある可能性がある」 ($\alpha \leq \rho < \beta$)
- (iii) 「電子透かしを正しく検出」 ($\rho \geq \beta$)

表 5.1: 実装を行なった携帯電話機のスペック

| | |
|------------|--|
| プロセッサ | 104MHz 32bit RISC |
| 動作プラットフォーム | Symbian OS Series 60 (C++) |
| ビデオキャプチャ | 176 × 144 画素 (4:2:0 format) 平均 14.92 フレーム/秒 |

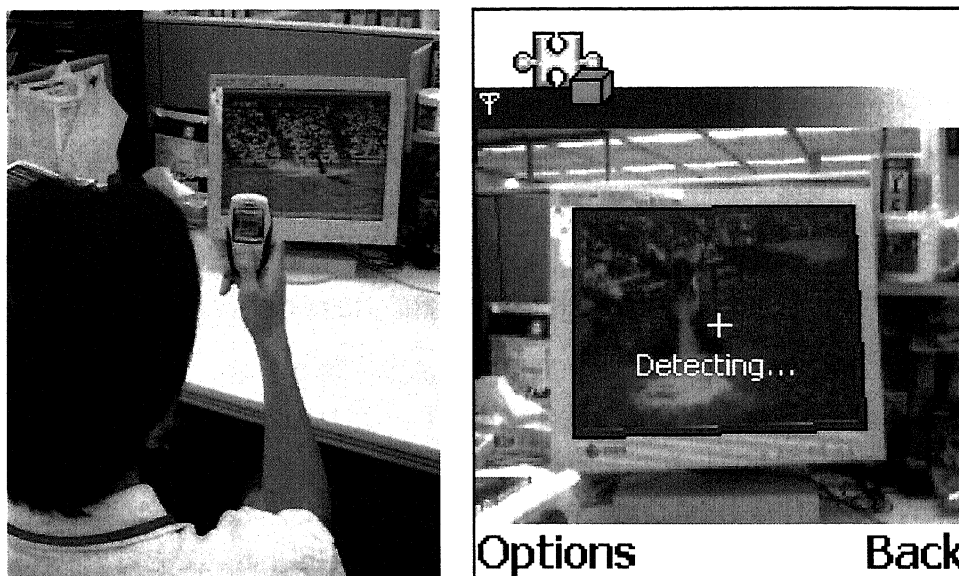


図 5.6: 実験風景 (左) と実験プログラムの実行中画面 (右)

の3つ検出信頼度ステータスを得ることができる。(ii)のケースを用いて後述するように電子透かしの検出可能性を利用者にフィードバックすることが可能である。

5.6 実装と評価実験

提案方式の有効性を確認するため、携帯電話実機への実装を行ない、評価実験を行なった。

5.6.1 実装

実験プログラムの実装を行なった携帯電話機 (Nokia 6600) のスペックを表 5.1 に示す。この端末は 2003 年に発売されたもので、現在ではかなりロースペックであり既に動作周波数が倍以上の機種も安価に販売されているが、提案方式の高速性を確認する意味で敢えて用いた。

検出対象領域抽出には輝度成分画像を用いたが、透かしパターンの埋め込みはCb成分を用いた。これは、人間の視知覚は輝度成分よりも色差成分の方が感度が低く、さらにr-g方向よりもy-b方向の色相変化のほうがより感度が低い[83]という視覚特性を考慮して、電子透かし埋め込みによる画質劣化をより知覚されにくくするためである。

キャプチャフレームが4:2:0 format であるため、電子透かし検出は実質 88×72 画素内の映像表示領域から行なわれることになる。

誤り訂正/検出符号には(31+1,16) 拡大 BCH 符号(2重ビット誤り訂正)を用い、各フレームに16ビットの情報を埋め込んだ。このうち1ビットをビット反転フラグに用いるため、有効な透かし情報長は15ビットとなる。また、予備実験から透かしパターンの反転頻度を15反転/秒と定めた。その他のパラメータとしては $N = 32, M = 18, L = 28$ を用いた。

図5.6に実験風景と実験プログラムの実行中画面を示す。次節の評価のため、表示領域探索処理および電子透かしの有無判定は常時行ない、ボタン押下後に電子透かし検出を2秒間連続して行なうようにしている。検出信頼性については5節の議論に従い、検出信頼度指標値 ρ が $\alpha = 4.8$ 以上の時 ($P_f < 10^{-6}$ に相当) に透かしが存在すると判定し、ボタン押下後2秒以内(試行回数 $L = 28$) に ρ が $\beta = 8.5$ 以上かつ BCH 復号によって誤り訂正可能なとき ($P'_m < 2.8 \times 10^{-3}$ に相当) に電子透かし検出成功と判定する。

実験プログラムでは、ボタン押下時でなくてもリアルタイムに表示領域抽出結果および電子透かしの存在有無をフィードバックし(電子透かし有と判定した場合はプレビュー画面上の検出対象領域を示す線の色を変化させる)、利用者に電子透かしの存在を提示したり、利用者側で電子透かしが検出しやすくなるように撮影角度などを調整することが可能である。

5.6.2 評価実験

図5.7に示す映像情報メディア学会の標準動画像3種(Horse Race, Whale Show, Baseball, シーケンス長:15秒, 29.97 fps, 720×480 画素)[84]を用いて、以下のようない評価実験を行なった。

画質評価

各評価用動画像に対して、3段階の埋め込み強度(=2,3,4, 256階調のCb成分に対する透かしパターンの振幅値)で電子透かしを埋め込んだものを18インチのPC

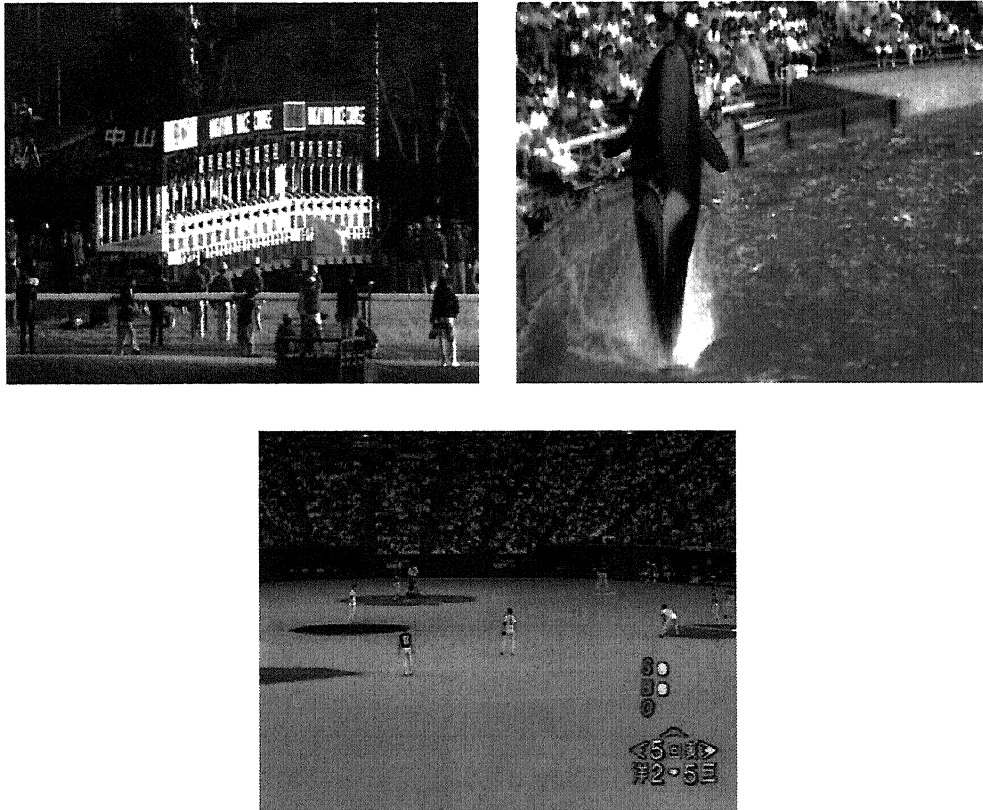


図 5.7: 評価用動画像: Horse Race(左上), Whale Show(右上), Baseball(下)

用液晶ディスプレイ (EIZO FlexScan L66) に出力し、原画との対比による画質劣化度合いを主観評価 (被験者 12 名) によって得た結果を図 5.8 に示す (評価方法: 被験者に原画 → 透かし入り画像 → 原画の順に提示し、2 番目の画像が透かし入りであることを事前に伝えた上で、原画と比較してどの程度劣化しているかを 5 段階の目盛のある連続スケールで回答)。今回の評価環境においては、設定した透かし強度やコンテンツの種類によらず、ほぼ劣化が知覚できないレベルであることが分かる。これにより 3 節の要件 (a) を満たすと言える。

耐性評価

埋め込み強度 = 3 で透かしを埋め込み、さらに 4 段階の MPEG-2 圧縮符号化 (非圧縮, 6, 3, 1.5 Mbps (CBR), FFMPEG[85] を使用) を行なった映像を上記液晶モニタ上で再生した。この再生映像を携帯電話実機を手で保持してカメラ撮影しながら実験プログラムで検出試行した場合の、検出成功率 (2 秒以内 (キャプチャレート

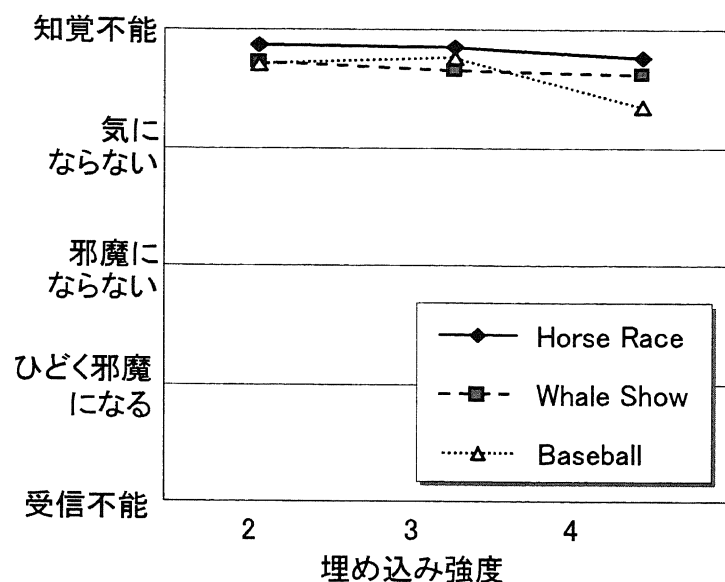


図 5.8: 画質主観評価結果

換算で試行回数 $L = 28$ 回に相当) に一度でも検出成功した場合の比率) および検出成功時の平均所要時間 (検出開始から 2 秒までの間での検出成功までの所要時間の平均) を表 2 に示す. ビデオキャプチャ時には表示領域があまり小さくなりすぎないように (概ねキャプチャフレームの 25% 以上の面積となるように) キャプチャするよう被験者に指示を行った.

まず非圧縮の場合についてみると, 劣化が知覚できない強度で埋め込んだ場合でも, フリーハンドで保持した携帯電話機によって電子透かしが確実に検出可能であることが分かる.

次に MPEG-2 圧縮耐性についてみると, Whale Show が特に圧縮に弱いという結果となっている. この理由として, Whale Show はパン・チルトなどのカメラワークの他, 水面のゆらぎなど複雑な動きを多く含むため, 差分画像のエネルギーが大きい上, さらに MPEG-2 符号化がしづらいため符号化による劣化が大きく, これらが透かしに対する大きなノイズとして影響を与えて検出が困難となるためではないかと推測した. この確認のため, 各原画像のフレーム間差分 (実際のキャプチャレートと合わせるため 2 フレーム遅延したフレームとの差分を取っている) の Cb 成分の分散の平均値を求めた結果を表 3 に示す. また, 透かしを埋め込まなかったときの原画像と MPEG-2 符号化画像との Cb 成分の PSNR 値を表 4 に示す. 予想通り, Whale Show は差分の分散, すなわちエネルギーが大きいこと, および MPEG-2 符号化ノイズが大きいことが分かり, 他の画像と比較して検出しづらい

表 5.2: 検出成功率と成功時の平均所要時間 (透かし強度=3)

| MPEG-2 圧縮 | 評価画像 | 検出成功率 | 平均所要時間 |
|-----------|------------|-------|--------|
| 非圧縮 | Horse Race | 100% | 0.57 秒 |
| | Whale Show | 100% | 0.43 秒 |
| | Baseball | 100% | 0.39 秒 |
| 6 Mbps | Horse Race | 100% | 0.59 秒 |
| | Whale Show | 100% | 0.46 秒 |
| | Baseball | 100% | 0.38 秒 |
| 3 Mbps | Horse Race | 100% | 0.69 秒 |
| | Whale Show | 60% | 0.99 秒 |
| | Baseball | 100% | 0.39 秒 |
| 1.5 Mbps | Horse Race | 73% | 0.86 秒 |
| | Whale Show | 37% | 1.25 秒 |
| | Baseball | 94% | 0.43 秒 |

(各画像についてランダムな検出開始タイミングで 30 回試行)

表 5.3: 原画像のフレーム間差分の Cb 成分の分散

| 評価画像 | 分散の平均 |
|------------|--------|
| Horse Race | 14.938 |
| Whale Show | 28.818 |
| Baseball | 3.315 |

画像であることが分かった。

しかしながら、DVDや放送品質レベル (6 Mbps に相当) では全ての画像で十分な圧縮耐性を有していると言える。特に Baseball のような動きの少ない画像では、1.5 Mbps まで圧縮してもかなり高い検出成功率を実現している。以上から 3 節の要件 (b) をほぼ満たすと言える。

さらに、本実験の検出成功基準は 2 秒以内であることから、要件 (c) を満たしていると言える。また、5 節の議論の通り、検出した透かし情報の信頼性を定量的に保証して検出の成否を判定しているため、要件 (e) も満たすと言える。なお、本実験中の試行回数 360 回のうち、false positive および message error は一度も生じなかった。

検出処理速度

評価用端末上での 1 フレームあたりの電子透かし検出処理時間は平均 40.75 msec. であった (比較のため PC (3.4GHz Pentium 4) で計測した処理時間は平均 0.9 msec.

表 5.4: 原画像と MPEG-2 符号化画像 (透かし無し) との Cb 成分 PSNR 値

| 評価画像 | 6 Mbps | 3 Mbps | 1.5 Mbps |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| Horse Race | 46.127 dB | 44.342 dB | 42.126 dB |
| Whale Show | 37.236 dB | 35.528 dB | 34.922 dB |
| Baseball | 45.035 dB | 43.237 dB | 41.714 dB |

であった). また, 電子透かし検出処理を行わずにキャプチャレビューのみを行なった場合のキャプチャレートは平均 14.92 fps (フレーム間隔 67 msec.) であった. このことから提案方式は順次入力されるフレームに間に合い, リアルタイム処理が可能であることが分かる. 実際に提案方式による電子透かし検出処理およびフィードバック出力を全て行なった場合では平均 14.87 fps であった. 端末上のシステム負荷状況などにより若干の処理落ちが見られるが, ほぼリアルタイム処理を実現でき, 遅延の少ないフィードバック出力が可能であるため, 要件 (d) を満たすと言える.

5.7 本章のまとめ

リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし技術の位置付けを明らかにし要件定義を行ない要件充足のために高速な矩形領域認識手法と高速・ロバストな動画電子透かし手法を組み合わせた方式を提案した. さらに提案方式は検出信頼性の定量的保証 (False Positive, Message Error) が可能であることも示した. 実機への実装および評価実験により, 全ての要件をほぼ満たすことを検証し, 提案方式の有効性を確認した.

今後の検討課題として, まず本手法の端末性能依存性の解消が挙げられる. これは, 端末のビデオキャプチャのフレームレートと連動して, 予め埋め込み時の透かしパターン切り替えタイミングを設定する必要があるため, 異なるキャプチャフレームレートの端末では検出性能が十分に得られない, という問題である. これについては次章で詳述し, 解決を図る. また, 透かし情報長の拡大, CRT や PDP など, 液晶以外の表示デバイスを用いた場合の画質及び耐性評価により, 提案手法の適用領域の広さを確認することも必要である. さらに, 現在の矩形認識手法では, 表示領域とディスプレイ筐体との間に明確なコントラストがない場合は縁取りが必要であるが, 縁取り無しでもフリーハンド撮影に対応できるような幾何歪み補正技術の確立も重要な課題である.

第6章 カメラ付携帯端末向けの高速な動画電子透かし技術：SFPSS法

第5章で示した方式の問題であった電子透かし手法の端末性能依存性を解消しつつ、さらなる耐性向上を実現するリアルタイム検出処理可能な高速動画向け電子透かし方式について示す。提案方式では、空間同期については第5章の方式と同じく高速矩形検出・追跡手法によって実現される。電子透かし手法としては、時間同期不要であり高いロバスト性を有する単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法) を示し、それを画素信号領域を対象とするように改良して高速化を図る。さらに第4,5章と同じく、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法についても示す。実機に実装して行った評価実験により、提案手法は第5章の方式で問題であった端末性能依存性を解消すると同時に、より高いロバスト性を有することを確認する。

6.1 はじめに

電子透かし技術の応用として、印刷やモニタ表示などでアナログ出力された透かし入り画像をカメラ付き携帯電話機で撮影して電子透かし検出を行ない、検出した透かし情報を用いてアナログ情報とデジタル情報サービスとを連携させるモバイル電子透かし技術が提案されている [74, 79]。従来のモバイル電子透かし技術は、印刷物などの静止画像を一枚撮影して検出処理を行なう静止画向けのものだった。

モバイル電子透かしの概念は静止画だけに限定されず、映像にも拡張して考えることができる。すなわち、TV 画面で再生されている TV 番組や DVD コンテンツ、あるいは街頭の大型ディスプレイなどに表示されている広告映像などにカメラを向けることで、詳細情報やオンラインショッピングサイトなどといった再生映像シーンに関連する情報サービスを享受できるようになる (図 6.1)。

映像には一般に MPEG-2 などの強力な圧縮符号化が施されるため、電子透かし技術には高いロバスト性が求められる。しかしながら、静止画向け電子透かし手法では映像の時間方向の特性を利用しないためロバスト性が不十分である。また、

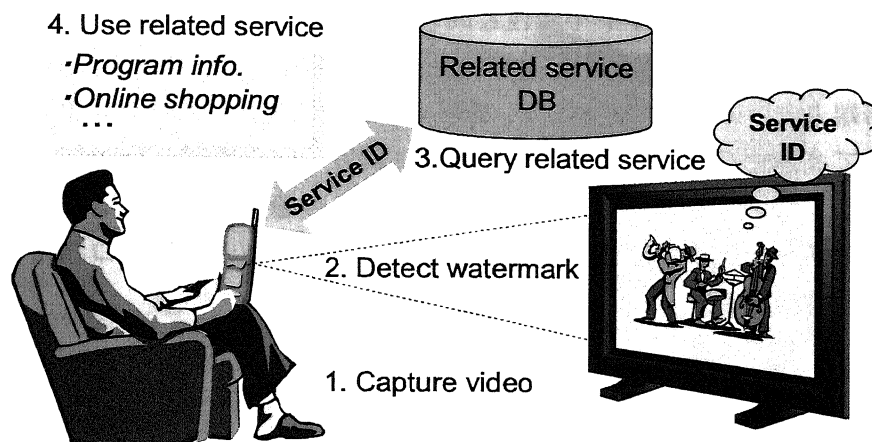


図 6.1: 映像向けモバイル電子透かし

再生映像をカメラで再撮影したものから検出可能な映像向け電子透かし技術が提案されているが [19, 18, 17, 80], 電子透かし検出時に原画像情報が必要であったり, 検出の際にキャプチャ映像が数十秒～数分程度必要であったり, PC 上での処理を前提としており検出処理量が多い, といった問題のためモバイル電子透かしに適用することは難しい。

上記を鑑み, 前章では携帯電話機上でリアルタイム検出処理が可能な映像向け高速電子透かし方式を提案した [86]. この方式 (以下「従来方式」と呼ぶ) では, 携帯電話機上でビデオキャプチャにより順次得られるキャプチャフレームの時間差分画像から電子透かし検出を行うことで, 原画信号を抑圧し電子透かし信号の S/N 比を向上させ高いロバスト性を実現している。

しかしながら, 従来方式では連続した 2 枚のキャプチャフレームの差分画像からのみ検出を行うため映像の時間方向の特性を十分に活用したものとは言えない。すなわち, より長い時間シーケンスからの電子透かし検出によるロバスト性改善の余地があった。

また, 検出時の 2 枚のキャプチャフレーム中の透かし信号が同相となっていると差分処理によって透かし信号成分もキャンセルされ検出が困難となってしまう。このため予め検出に用いる携帯電話機を限定して, 特定のビデオキャプチャフレームレートに合わせた電子透かし埋め込みを行う必要がある, という端末性能依存性の問題があった。これはモバイル電子透かしサービスの幅広い展開への大きな障害となる。

本章では, 単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法) に基づく映像向けモバイル電子透かし方式を提案

する。SFPSS 法は時間シフト不変性と高いノイズ耐性を有するが、空間周波数領域を対象とするため処理量が多く携帯電話機上での処理が困難である [87, 88]。そこで携帯端末向けの提案方式として、SFPSS 法を画素信号領域を対象とするように改良して高速化を図る。また、提案方式における電子透かし検出信頼性の定量的評価手法についても理論的考察を行う。評価実験を通じて、提案手法は従来方式で問題であった端末性能依存性を解消すると同時に、より高いロバスト性を有することを確認する。

6.2 要件定義

本稿で検討する映像向けモバイル電子透かしに求められる要件として、以下の5つを挙げる：

- (a) 画質劣化が視聴の妨げにならないこと
- (b) 様々な再生・撮影条件で検出可能なこと
- (c) 電子透かし検出処理が高速に行えること
- (d) 撮影を開始してから短時間で検出成功すること
- (e) 検出した透かし情報の信頼性を保証できること

電子透かしでは埋め込みに伴うコンテンツの劣化が必然であるため、要件 (a) では埋め込みによる画質劣化が知覚困難であることを要求する。要件 (b) では、映像の符号化圧縮や、映像の画面出力・カメラによる光学スキャン (D/A-A/D 変換) などに伴うノイズ耐性の他、フリーハンドによるビデオ撮影で生じる時々刻々と変化する映像表示領域の幾何歪み (空間同期外れ) や、ユーザによる任意のキャプチャ開始タイミングによる時間シフト (時間同期外れ) に対する耐性を要求する。要件 (c) では、携帯電話機上で処理可能な軽量な検出アルゴリズムを要求し、ユーザインタフェースの観点からは検出状況をリアルタイムにフィードバック可能なリアルタイム処理可能であることが望ましい [81]。要件 (d) では、モバイル電子透かしの利用シーンを考慮して検出開始から数秒程度の短時間で検出成功することを要求する。第5章と同じく、検出を開始してから検出結果を得るまでの時間が2~4秒以内となることがユーザインタフェース上の要件として適切であると考えられる。要件 (e) は、実サービス展開には必須の要件である。これが満たされないと、例えば本来埋め込まれている透かし情報とは異なる情報を誤検出してしまい、全く無関係な関連情報を提示してしまうといった問題が生じてしまう。

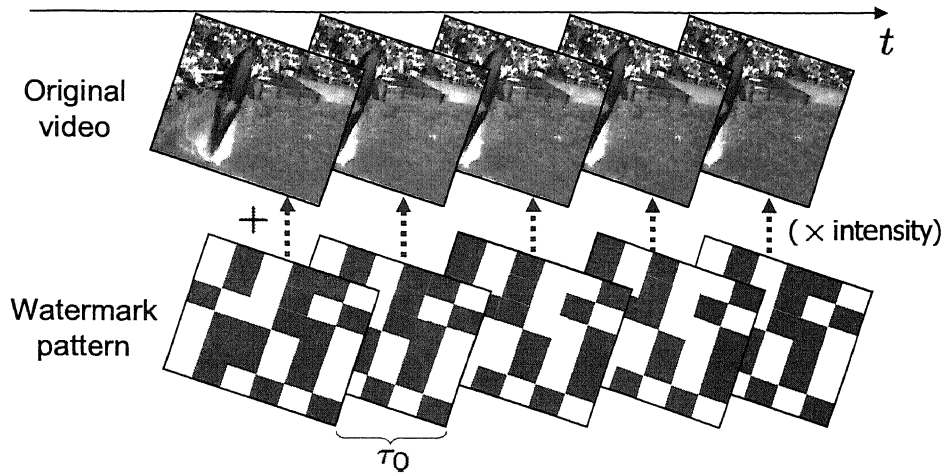


図 6.2: 従来方式における電子透かし埋め込み

検討の前提となる携帯電話機上のアプリケーションプラットフォームについても、第5章と同じくネイティブアプリケーションを想定することとする。

6.3 従来の映像向けモバイル電子透かし方式

まず、従来方式 [86] の概要を説明する。

6.3.1 従来方式における電子透かし埋め込み

k -bit の透かし情報を誤り訂正/検出符号化し、 N -bit の符号語 $\vec{c} = \{-1, 1\}^N$ を得る（ビット値を ± 1 の極性とみなす）。次に N 種類の実擬似乱数列 $\vec{x}^{(n)} = (x_1^{(n)} x_2^{(n)} \dots x_M^{(n)}) \in \mathbf{R}^M$ を生成し、次のようにして各 c_n をスペクトラム拡散変調する。

$$\vec{z}^{(n)} = c_n \vec{x}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (6.1)$$

次に、 $\vec{z}_m^{(n)}$ を二次元に配置し、 MN 個のブロックから構成される入力映像のフレーム解像度と同じ大きさの透かしパターンを生成する。最後に、生成した透かしパターンを透かし強度パラメータで増幅したのち、入力映像の各フレームに対して重畳して埋め込みを行なう。重畳の際には、透かしパターンの正負を予め定めた時間 τ_0 で反転させながら入力映像の各フレームに重畳を行なうようにする（図 6.2）。

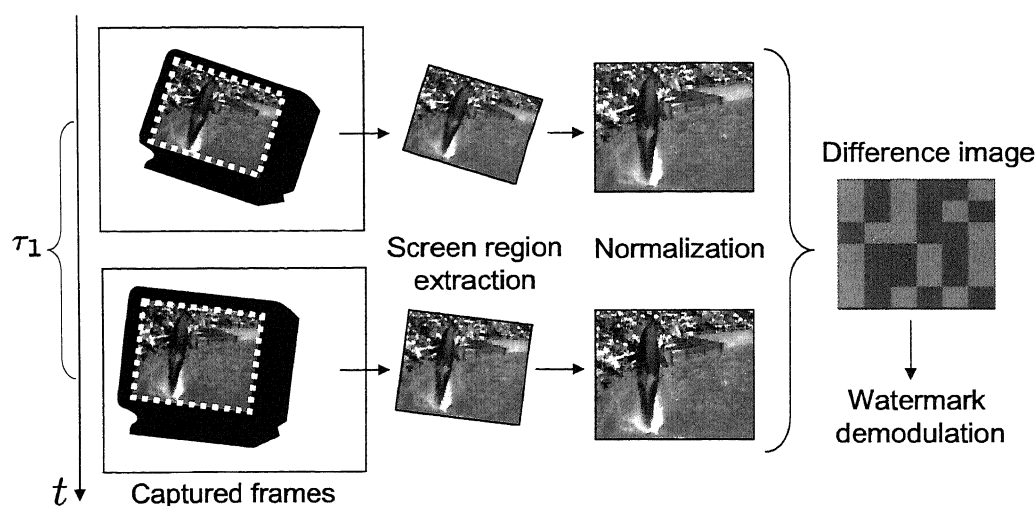


図 6.3: 従来方式における電子透かし検出

6.3.2 従来方式における電子透かし検出

前節のようにして電子透かしが埋め込まれた映像が TV などの表示画面上で再生される。図 6.3 にカメラキャプチャからの電子透かし検出処理の流れを示す。以下の全ての処理が携帯電話機上でリアルタイムに実行される。

空間同期

カメラ付き携帯電話機によるビデオキャプチャで順次得られるキャプチャフレーム中の映像表示領域は、撮影角度による平面射影歪みで変形し、さらにフリーハンド撮影によって歪み度合いが時間変化する。これに対処するため各フレームごとに幾何補正（空間同期）を行う。具体的には、高速な矩形追跡手法 [82] を用いて、各キャプチャフレーム中の矩形領域である映像表示領域を追跡・抽出する。抽出した映像表示領域を幾何補正し、正規化画像を各キャプチャフレームから順次取得する (図 6.3)。

正規化映像からの電子透かし検出

今回のキャプチャフレームから得られた正規化画像について、直前に得られた正規化画像との差分画像を生成する (図 6.3)。次に差分画像を MN 個のブロックに分割し、各ブロックの平均画素値を求めて要素数 MN の配列を得る。配列を 1 次元に並べ替えて埋め込み時の $\hat{y}^{(n)}$ に対応する系列 $\hat{y}^{(n)}$ を得る。そして埋め込

み時の擬似乱数列 $\vec{x}^{(n)}$ との内積

$$s_n = \vec{y}^{(n)} \cdot \vec{x}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (6.2)$$

を求め、 s_n の正負に基づいて検出ビット値を決定することでスペクトラム拡散復調を行い、最後に誤り訂正/検出復号を行なって電子透かし情報を復調する。

以上の3.2.1節から3.2.2節の処理を電子透かしが検出成功するまで順次繰り返す。

6.3.3 従来方式の問題点

従来方式は2枚の連続するキャプチャフレームのみから電子透かし検出を行うため、複雑な時間同期処理が不要な点が利点ではあるが、映像の時間方向の特性を十分に活用したものとは言えない。すなわち、より長い時間シーケンスからの電子透かし検出による耐性改善の余地がある。ただし長い時間シーケンスを用いる場合には、時間同期外れ対応のために検出処理が複雑化して携帯電話機上の処理が困難となったり、検出成功までの所要時間が増大するおそれがある。

また、検出時において2枚のキャプチャフレーム間で埋め込まれている透かしパターンが逆相となっている時には、差分処理によって原画像成分を大きく抑圧できかつ透かし信号成分が埋め込み時の倍の振幅で得られるので、S/N比が向上し高耐性な電子透かし検出が可能となる(図6.3)。例えば、埋め込み時のパターン反転周期 τ_0 と検出時のフレームキャプチャ時間間隔 τ_1 が同じである場合は常にこの効果が得られる。

しかし τ_0 と τ_1 が異なっている場合には上記の特性が十分に得られない。つまり2枚のキャプチャフレーム内の透かしパターンが同相である場合には、差分処理によって透かし信号成分も消失してしまうため、電子透かしの検出が不可能となる。 τ_1 は携帯端末のビデオキャプチャフレームレート依存であることから、一つの透かし入り映像では異なるキャプチャフレームレートを持つ多様な端末に同時に対応することができず、端末によっては電子透かしの検出が困難になるという端末性能依存性の問題がある。

6.4 SFPSS法による映像電子透かし

SFPSS法(Single Frequency Plane Spread Spectrum)による動画向け電子透かし手法を示す。

SFPSS法では、複素数の擬似乱数列 $\vec{\xi} = (\xi_1 \xi_2 \dots \xi_L) \in \mathbf{C}^L$ を、図6.4に示すように入力映像の時空間周波数領域内の単一の時間周波数を持つ平面 \mathcal{P} 上から選択

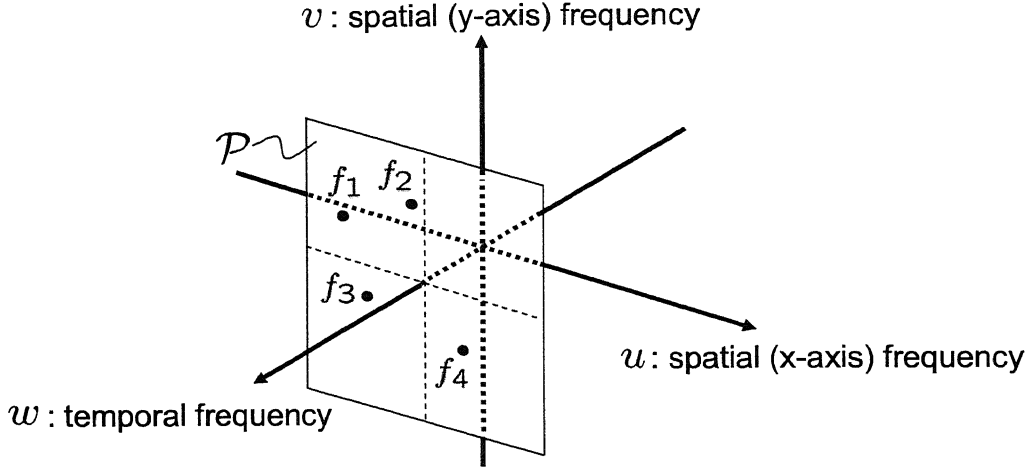


図 6.4: SFPSS 法による単一時間周波数平面への拡散系列埋め込み

した係数値列 $\vec{f} = (f_1 f_2 \dots f_L)$ に埋め込む.

$$\vec{g} = \vec{f} + \vec{\xi} \quad (6.3)$$

映像に対し時間シフト Δt が与えられたとき, DFT (離散フーリエ変換) の性質から同一の時間周波数フーリエ係数には等しい位相変位 $\Delta\theta = 2\pi\Delta t/T$ (T は時間周波数に対応する周期) が加わり, 係数値は $\vec{g}^j = \vec{g}e^{j\Delta\theta}$ へと変化する (j は虚数単位).

検出時には \vec{g}^j と $\vec{\xi}$ の相関値 (Hermite 積) を計算する.

$$\lambda = \vec{g}^j \cdot \vec{\xi} = (\vec{f} \cdot \vec{\xi} + |\vec{\xi}|^2)e^{j\Delta\theta} \quad (6.4)$$

\vec{f} , $\vec{\xi}$ が独立で L が十分大きければ $\vec{f} \cdot \vec{\xi}$ の期待値は 0 で,

$$\lambda \approx |\vec{\xi}|^2 e^{j\Delta\theta} \quad (6.5)$$

となる. 従って λ の絶対値が十分大きいとき, $\vec{\xi}$ が埋め込まれていたと判断できる. $|\lambda|$ は時間シフト量 Δt に対する不変量であるから, SFPSS 法では時間同期処理を必要としない. また, フーリエ係数の振幅値に実乱数列を埋め込むような手法 [60] などと比べて, 複素乱数列を用いることにより拡散率が倍増することからノイズに対してよりロバストである [87, 88].

しかしながら上記の手法では検出時に空間方向周波数成分を求めるために 2 次元 DFT が必要である (単一時間周波数のフーリエ係数を求めるのみなので 3 次元 DFT までは必要ない). また, 透かし情報は直交符号化 (一種類の乱数列で一つの透かし情報を表現) されているため, 検出時には取りうる透かし情報に対応す

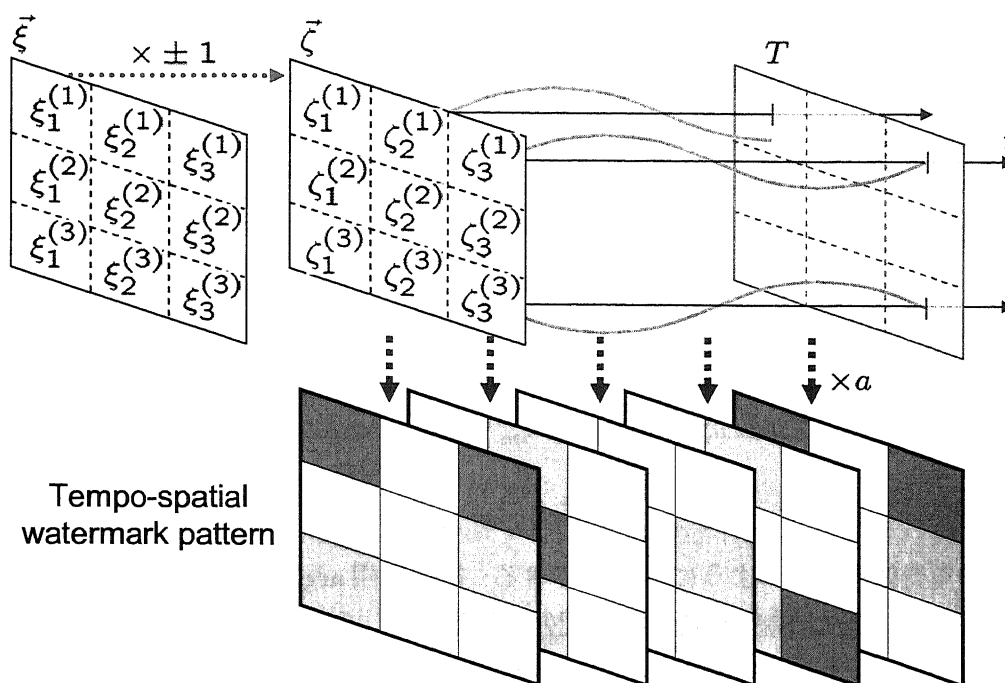


図 6.5: 画素領域を用いた SFPSS 電子透かし埋め込み

る全ての複素乱数列との相関計算が必要である（例えば 16 ビットの透かし情報の場合 $2^{16} = 65536$ 種類の乱数列の各々との相関計算が必要）。これらの処理量の大きさのため上記手法を直接モバイル電子透かしに適用することは困難である。

6.5 提案方式

提案方式は、時間シフト不変かつノイズ耐性が高い SFPSS 法を高速化改良した電子透かし手法と、従来方式と同様の空間同期のための高速矩形抽出手法から構成される。

SFPSS 法の本質は、時間方向と直交した空間において複素スペクトラム拡散変調を行い、さらに単一時間周波数上に重畳することである。従来の SFPSS 法では空間周波数領域を直交空間としていたため 2 次元 DFT が必要であったが、提案手法では直交空間を画素信号領域とするように変更する。さらに、透かし情報を直交符号化するのではなくビット毎に直接拡散するように変更して検出処理の高速化を図る。

6.5.1 提案方式における電子透かし埋め込み

まず、 k ビットの透かし情報を誤り訂正/検出符号化し N ビットの符号語 $\vec{c} = \{-1, 1\}^N$ を得る。次に、 N 種類の複素乱数列 $\vec{\xi}^{(n)} = (\xi_1^{(n)} \xi_2^{(n)} \dots \xi_M^{(n)}) \in \mathbf{C}^M$ を用意する。 \vec{c} の各ビットを次のようにスペクトラム拡散変調して複素系列群 $\vec{\zeta}^{(n)} = (\zeta_1^{(n)} \zeta_2^{(n)} \dots \zeta_M^{(n)})$ を得る。

$$\vec{\zeta}^{(n)} = c_n \vec{\xi}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (6.6)$$

そして、入力映像を MN 個のブロック映像に分割し、各ブロックの周期 $T(\text{sec.})$ の時間方向フーリエ係数 $\nu_m^{(n)}$ に対して、 $\zeta_m^{(n)}$ を埋め込み強度 a で増幅して加算する。

$$\vec{\nu}'^{(n)} = \vec{\nu}^{(n)} + a \vec{\zeta}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (6.7)$$

この重畳処理は次のようにも表現できる：初期位相 $\arg \zeta_m^{(n)}$ 、振幅 $a|\zeta_m^{(n)}|$ 、周期 T の時間方向正弦波信号群を2次元配列に配置する。入力映像の時刻 t のフレームに対して、上記配列の時刻 t の時間断面をブロックパターンとしてフレームに重畳する (図 6.5)。

6.5.2 提案方式における電子透かし検出

前節のようにして電子透かしが埋め込まれた映像が、TV などの表示画面上で再生される。以下に説明する手順で、再生映像を携帯電話機のカメラでビデオキャプチャしながら電子透かし検出を行なう。以下の全ての処理が携帯電話機上で実行されるため、高速性が求められる。

空間同期

従来方式と同様、4.2.1 節で述べた高速な矩形追跡手法 [82] を用いてキャプチャフレーム中の映像表示領域を追跡・抽出することにより、フリーハンド撮影によって時間変化する平面射影歪みを補正する。順次得られる正規化画像の列を正規化映像とする。

フーリエ係数算出

正規化映像を MN 個のブロック映像に分割し、各ブロックについて周期 T の時間方向フーリエ係数 $\eta_m^{(n)}$ を算出して、 N 個の複素系列 $\vec{\eta}^{(n)} = (\eta_1^{(n)} \eta_2^{(n)} \dots \eta_M^{(n)})$ を得る。ここで、ユーザ操作によるキャプチャ開始タイミングの任意性から、正規

化映像は埋め込み直後の映像と比べて任意の Δt だけ時間シフトしている。ノイズを無視して時間シフトだけを考慮すると、全ての $\vec{\eta}^{(n)}$ には以下のように共通な位相変位 $\Delta\theta = 2\pi\Delta t/T$ が加わっている。

$$\vec{\eta}^{(n)} = \vec{\nu}^{(n)} e^{j\Delta\theta} \quad (n = 1 \dots N) \quad (6.8)$$

なお、単一周波数のフーリエ係数を求めるには、ビデオキャプチャ時に新たなフレームが得られる度に基底関数 $e^{-j\frac{2\pi t}{T}}$ と画素値との積和を逐次行なうだけで良いため DFT が不要であり高速処理が可能である。

複素相関によるスペクトラム拡散復調

$\vec{\eta}^{(n)}$ と埋め込みに用いた複素乱数列 $\vec{\xi}^{(n)}$ との相関値 (Hermite 積) を求める。

$$\lambda_n = \vec{\eta}^{(n)} \cdot \vec{\xi}^{(n)} = \sum_{m=1}^M \eta_m^{(n)} \xi_m^{(n)*} \quad (n = 1 \dots N) \quad (6.9)$$

ここで * は複素共役を表す。式 (6)(7)(8) を用いると

$$\lambda_n = (\vec{\nu}^{(n)} \cdot \vec{\xi}^{(n)} + ac_n |\vec{\xi}^{(n)}|) e^{j\Delta\theta} \quad (6.10)$$

となる。式 (10) の第 1 項は原映像成分と複素乱数列との相関であるから期待値 0 であり、第 2 項は定数項である。よって、 $|\lambda_n|$ の期待値は

$$E[|\lambda_n|] = a |\vec{\xi}^{(n)}| \quad (6.11)$$

となり、時間シフト Δt に不変である。また、電子透かしが埋め込まれていない場合は式 (10) の第 2 項がないので $E[|\lambda_n|] = 0$ となるから、次節で述べるように $|\lambda_n|$ に基づいて透かしの有無を判定できる。

式 (10) から、埋め込まれているビット値 c_n が異なると、 λ_n は複素平面上で原点对称に分布する。ロバストなビット値検出のため次のような工夫をする： λ_n のうち、 $\pi \leq \arg \lambda_n < 2\pi$ となるものについては -1 を乗積して全ての λ_n が同じ方向を向くように揃え、これらの総和 $\hat{\lambda}$ を求める (図 6.6 の例では $\hat{\lambda} = \lambda_1 + (-\lambda_2) + \dots$)。そして $\hat{\lambda}$ に直交する境界線により複素平面を 2 つの領域に分割し、どちらの領域に λ_n が属するかで検出ビット値 d_n を決定する (図 6.6)。 $\hat{\lambda}$ は全ての λ_n を用いて算出され、より大きな絶対値を持つ値であるため、 $\hat{\lambda}$ を基準にビット値判定をすることによってロバストなビット値検出が可能となる。

最後に検出符号語 \vec{d} に対して誤り訂正/検出復号を行なって透かし情報を復調する。

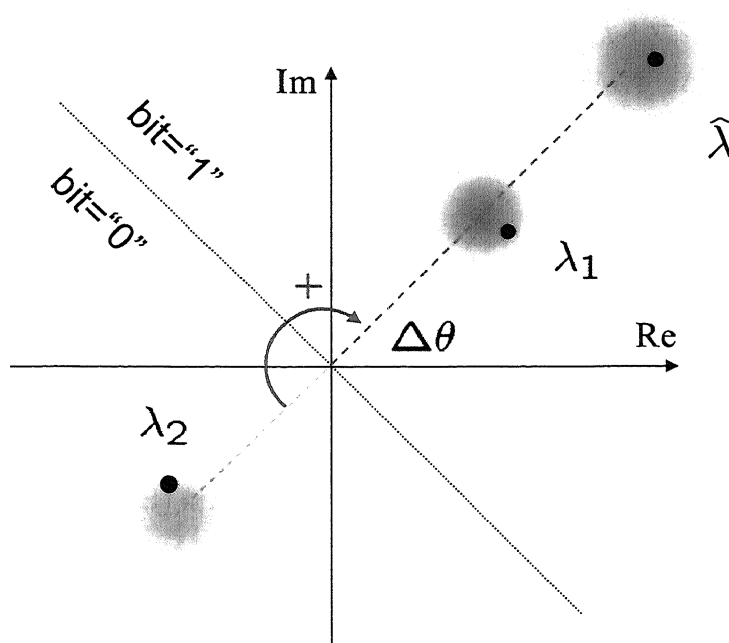


図 6.6: 複素相関値からのビット値検出

なお、上記のビット値復調法では、キャプチャタイミングによっては検出符号語が本来の値のビット反転となることがある。誤り訂正/検出符号に BCH 符号などの線形符号を用いた場合、ビット反転した符号語からビット反転した情報が復号されてしまうため、検出透かし情報が正しく得られないおそれがある。このビット反転不確定性問題に対して、透かし情報中の1ビットをビット反転判定用のフラグビットとして利用するなどして対応する。

6.5.3 提案方式による効果

従来方式ではスペクトラム拡散変調に実乱数列を用いていたが、提案方式では複素乱数列を用いることで拡散率が倍増するためノイズ耐性が向上する [87, 88]。さらに従来方式では2枚のキャプチャフレームのみから検出していたが、提案方式ではより長い時間シーケンスから得られる時間フーリエ係数を利用して検出を行うため、ノイズ耐性の向上およびキャプチャフレームレート独立な電子透かし埋め込み・検出が可能となる。同時に、SFPSS法の持つ時間シフト不変性によって時間同期処理が不要であるので電子透かし検出の高速性も期待できる。

また、提案方式ではSFPSS法を画素信号領域に適用し、かつビット毎の直接拡散変調を用いたため、空間周波数領域・直交符号化を用いていたオリジナルのSFPSS

法よりも高速な検出処理が可能となる。

これらの効果については7節の評価実験において検証を行う。

6.6 検出信頼性

電子透かし検出の信頼性上問題となるエラーは、false positive（電子透かしが埋め込まれていないものから検出成功してしまう誤り）、message error（埋め込まれている情報と異なる情報を検出成功してしまう誤り）に分類できる [6, 79, 86]. 電子透かしの検出処理時には、原映像信号、透かし情報、埋め込み強度が不明であるため、これらを用いずに信頼性を評価しなければならない。

6.6.1 False positive

電子透かしが埋め込まれていない時の λ_n は、 M が十分大きければ中心極限定理によって実部、虚部がそれぞれ標準正規分布 $N(0,1)$ の複素正規分布に従うように正規化でき、その大きさ $r_n = |\lambda_n|$ の分布は確率密度関数 $p(r) = re^{-\frac{r^2}{2}}$ ($r \geq 0$), 0 ($r < 0$) に従う [87, 88]. ここで $E[r] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$, $V[r] = 2 - \frac{\pi}{2}$ と計算できる. 検出時には、複素相関値の大きさ r_n の総和を用いて、以下のように信頼度指標値 κ を計算する。

$$\kappa = \frac{\sum_{n=1}^N r_n - NE[r]}{\sqrt{NV[r]}} \quad (6.12)$$

電子透かしが埋め込まれていない時の κ は、 N が十分大きければ中心極限定理によって $N(0,1)$ に従う。逆に κ が $N(0,1)$ から大きく外れている時は電子透かしが埋め込まれていると推定できる。指標値 κ が得られた時に、電子透かし無しの入力に対して電子透かしが存在すると誤判定する確率は $\frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{\kappa}{\sqrt{2}}\right)$ となる。false positive rate P_f は、さらにランダムビット列に対する誤り検出符号の誤り見逃し率 $P_e(\frac{1}{2})$ をかけて以下ようになる。

$$P_f(\kappa) = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{\kappa}{\sqrt{2}}\right) P_e\left(\frac{1}{2}\right) \quad (6.13)$$

6.6.2 Message error

指標値 κ に対する検出符号語 \vec{c} の BER (Bit Error Rate) は、 κ が検出した電子透かしの信号強度とみなせるから、 κ に対して単調減少である。 κ に対する BER p の確率密度関数を $f_\kappa(p)$ とする。誤り検出符号の誤り見逃し率は一般に BER p の

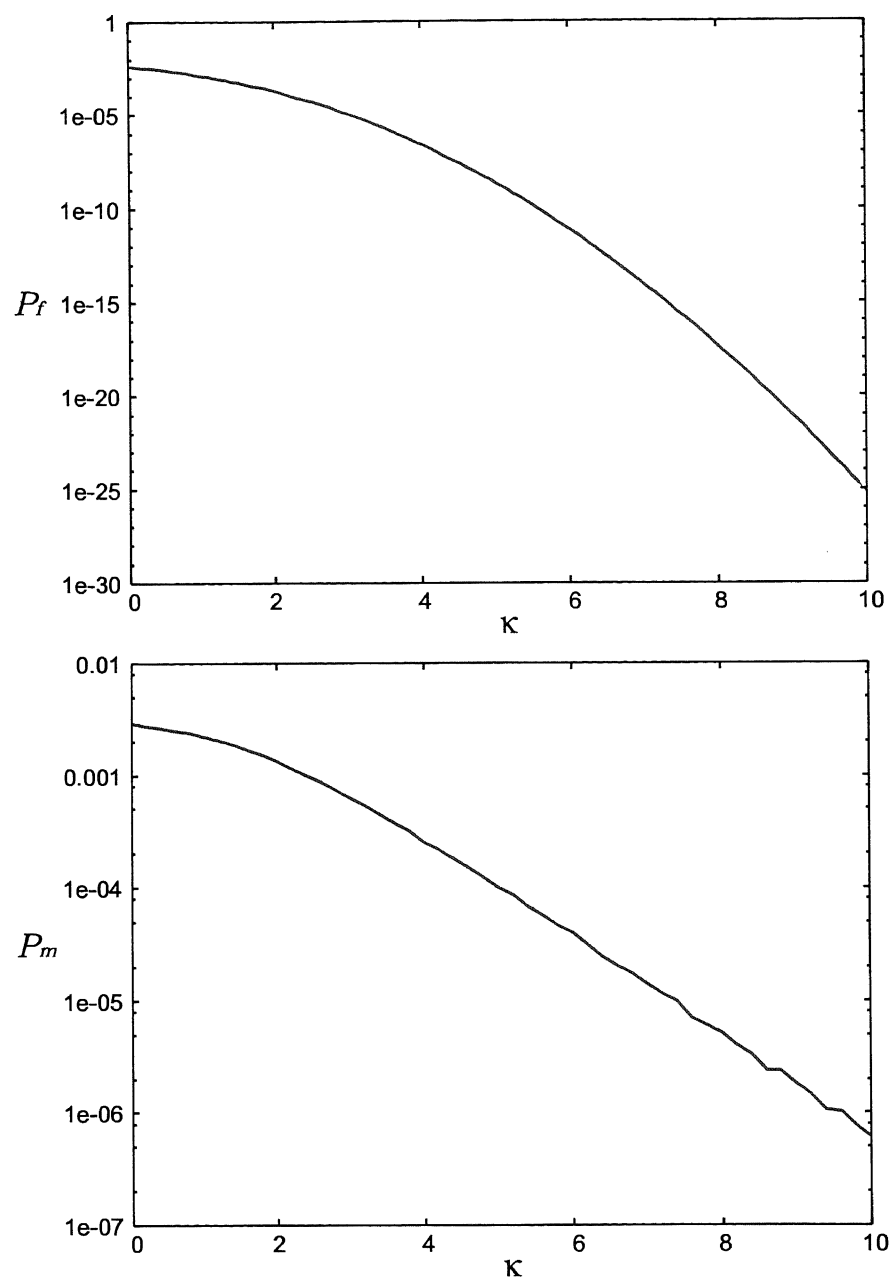


図 6.7: 検出信頼度指標値 κ に対する false positive rate P_f (上) と Message error rate P_m (下)

表 6.1: 実装を行なった携帯電話機のスペック

| | |
|---------------|--|
| Processor | 32bit RISC (ARM9) 220MHz |
| Platform | Symbian OS v8.0a Series 60 (C++) |
| Camera | 1.23mega-pixels CMOS |
| Video Capture | 176 × 144 pixels (4:2:0 format) 14.98 frames/sec. |

関数 $P_e(p)$ である [77]. これらを用いると指標値 κ が得られた時の message error rate P_m は以下のように表せる.

$$P_m(\kappa) = \int_0^\infty P_e(p) f_\kappa(p) dp \quad (6.14)$$

次節の実験条件の元での, 指標値 κ に対する P_f と P_m を図 6.7 に示す. $f_\kappa(p)$ はシミュレーションによって求めたが, その他は理論的に導出された値を用いてプロットした. 実際の検出時には, κ に対する閾値判定により所望の信頼性を保証できる.

6.7 評価実験

提案手法の有効性を確認するため, 提案手法を携帯電話機上のソフトウェアとして実装し以下の実験を行った. 実験には次のパラメータを用いた: $k = 15$, $N = 32$, $M = 18$, $T = 0.53$ 秒, 誤り訂正/検出符号は (31+1,16) 拡大 BCH 符号 (2 重ビット誤り訂正), 表示装置は 50 インチのプラズマテレビジョン. 実験に用いた携帯電話機 (Nokia 6630) のスペックを表 1 に示す. 電子透かしの埋め込みには Cb 成分を用いた. これは, 人間の視知覚は輝度成分よりも色差成分の方が感度が低く, さらに r-g 方向よりも y-b 方向の色相変化のほうがより感度が低い [83], という視覚特性を考慮したためである. キャプチャフレームは 4:2:0 format であるため, 電子透かし検出は実質 88×72 画素内の映像表示領域から行なわれる.

図 6.8 に実験風景と実験プログラムの実行中画面を示す. 実験プログラムでは, 表示領域抽出結果 (矩形を縁取り) および電子透かしの検出状況 (信頼度指標値 κ をプログレスバー表示) をリアルタイムにフィードバック出力することより, 利用者に電子透かしの存在を提示したり, 利用者自身によって電子透かしが検出しやすくなるように撮影角度やズームなどを調整することができるようにした.

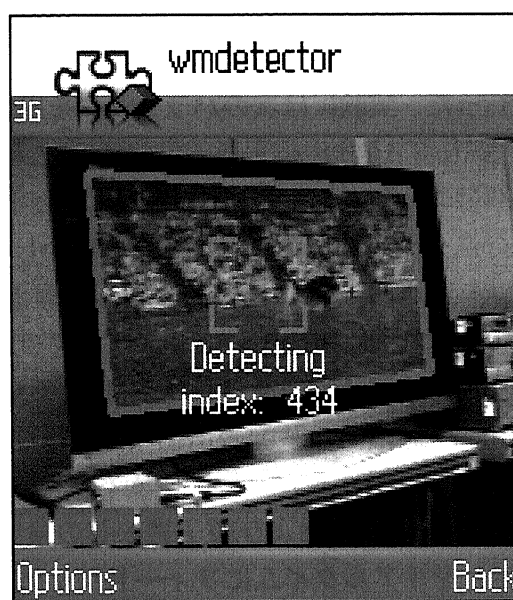
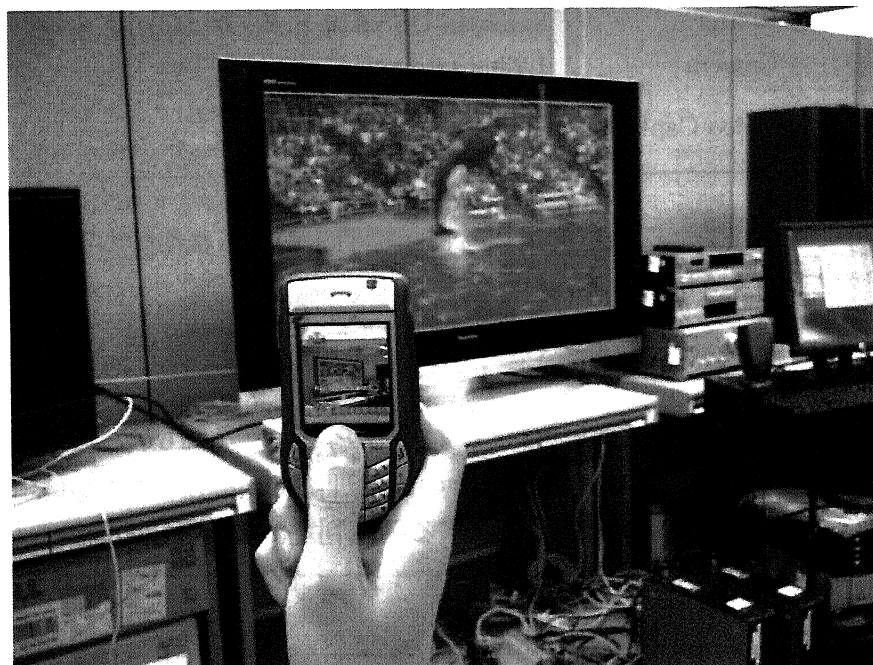


図 6.8: 実験風景（左）と実験プログラムの実行中画面（右）

6.7.1 映像品質

映像情報メディア学会の標準映像3種[84](Street Car, Harbor Scene, Whale Show, 720×480 pixels, 29.97 FPS (Frames Per Second)) に対して、電子透かしによるCb成分(8 bit)の変更量の分散が1となる強度で埋め込みを行なった。この時のCb成分のPSNRは映像によらず約49.7 dBであり、目視では画質劣化は感知できなかった。

なお、次節のロバスト性の比較のために従来方式についても同じくCb成分を利用した透かし入り映像を作成した。ここで提案方式では透かしパターンの時間周波数が約2 Hzであるが、従来方式では実験端末のキャプチャレートが14.98 FPSであることから3.3節の議論に基づき透かしパターン時間周波数を7.5 Hzに設定した。視覚の時空間周波数特性に関する研究から、y-b方向について7.5 Hzの知覚限界感度は2 Hzと比較して約5 dB程度低下することが知られている[89]。このため、従来方式については透かし信号強度を5 dB分強めて埋め込みを行い、提案方式と視覚劣化度合いを合わせて評価を行うこととした。

6.7.2 ロバスト性

上記3種の電子透かし埋め込み映像をMPEG-2符号化してディスプレイ上で再生し、カメラ付き携帯電話機を手で保持してランダムなタイミングで電子透かし検出を行った。提案方式ではフーリエ係数算出の際の積算時間が長い程ロバストとなるため、積算時間を1/2/3秒と変えて実験を行った。また、6節の議論に基づいて、信頼度指標値 κ が閾値5.0以上かつ誤り訂正/検出復号によって正しく復号した場合を電子透かし検出成功の条件とした ($P_f < 2.3 \times 10^{-9}$, $P_m < 10^{-4}$ を保証可能)。また、ビデオキャプチャ時には映像表示領域があまり小さくなりすぎないように(概ねキャプチャフレームの25%以上の面積となるように)キャプチャするよう被験者に指示を行った。実験結果を表2に示す。劣化が知覚できない程度の強度で電子透かしを埋め込んだ映像をフリーハンドでキャプチャしても検出が可能であり、3 Mbps(低品質のDVD Video相当)のMPEG-2圧縮に対する耐性も十分であった。また、電子透かし検出成功までの所要時間も数秒程度と短時間であった。これらにより提案方式は要件(a),(b),(d),(e)を満たすものであるといえる。

比較のために従来方式の検出結果を表3に示す。表中の1/2/3秒は検出開始から各時間内での検出成功率を表す。また、 $P_m < 10^{-4}$ を保証可能となるように検出成功基準を合わせた。提案方式と比較して、従来方式では全般に検出成功率が低く、提案方式の優位性を確認できた。特に圧縮率が高い時に検出能力の差が顕著

表 6.2: 提案方式の電子透かし検出結果 (14.98 FPS でキャプチャ時)

| MPEG-2 | Video | Success rate | | |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|--------|
| Compression | sequence | 1 sec. | 2 sec. | 3 sec. |
| Uncompressed (120 Mbps) | Streetcar | 100% | 100% | 100% |
| | Harbor Scene | 100% | 100% | 100% |
| | Whale Show | 100% | 100% | 100% |
| 6 Mbps | Streetcar | 100% | 100% | 100% |
| | Harbor Scene | 97% | 100% | 100% |
| | Whale Show | 93% | 100% | 100% |
| 3 Mbps | Streetcar | 90% | 100% | 100% |
| | Harbor Scene | 43% | 87% | 100% |
| | Whale Show | 50% | 93% | 100% |

表 6.3: 従来方式の電子透かし検出結果 (14.98 FPS でキャプチャ時)

| MPEG-2 | Video | Success rate | | |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|--------|
| Compression | sequence | 1 sec. | 2 sec. | 3 sec. |
| Uncompressed (120 Mbps) | Streetcar | 70% | 96% | 100% |
| | Harbor Scene | 63% | 93% | 100% |
| | Whale Show | 60% | 93% | 100% |
| 6 Mbps | Streetcar | 37% | 70% | 90% |
| | Harbor Scene | 30% | 63% | 77% |
| | Whale Show | 30% | 50% | 70% |
| 3 Mbps | Streetcar | 20% | 37% | 53% |
| | Harbor Scene | 7% | 20% | 27% |
| | Whale Show | 7% | 27% | 30% |

であった。

次に、実験端末でのキャプチャフレームを 1/3 に間引きし、4.99 FPS でのビデオキャプチャ相当とした場合の提案方式および従来方式の検出結果をそれぞれ表 4、表 5 に示す。従来方式では、透かしパターン周波数とキャプチャレートが揃わないため表 3 と比較して検出性能が大幅に低下した。しかし、提案方式では検出成功率は高いままであり、キャプチャレートの低い端末でも十分なロバスト性を実現できた。この結果から、提案方式は従来方式の課題であった端末性能依存性を解消し同一の埋め込み映像に対してスペックの異なる様々な端末で電子透かしを確実に検出することができ、映像向けモバイル電子透かしサービスの幅広い展開に寄与できるものであるといえる。

なお、本実験での提案方式の総試行回数 1,620 回において、false positive および message error は一度も生じなかった（従来方式についても false positive および message error は一度も生じなかった）。

表 6.4: 提案方式の電子透かし検出成功率（4.99 FPS でキャプチャ時）

| MPEG-2 | Video | Success rate | | |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|--------|
| Compression | sequence | 1 sec. | 2 sec. | 3 sec. |
| Uncompressed (120 Mbps) | Streetcar | 100% | 100% | 100% |
| | Harbor Scene | 100% | 100% | 100% |
| | Whale Show | 100% | 100% | 100% |
| 6 Mbps | Streetcar | 100% | 100% | 100% |
| | Harbor Scene | 80% | 100% | 100% |
| | Whale Show | 70% | 97% | 100% |
| 3 Mbps | Streetcar | 77% | 97% | 100% |
| | Harbor Scene | 10% | 67% | 93% |
| | Whale Show | 17% | 73% | 97% |

表 6.5: 従来方式の電子透かし検出成功率（4.99 FPS でキャプチャ時）

| MPEG-2 | Video | Success rate | | |
|----------------------------|--------------|--------------|--------|--------|
| Compression | sequence | 1 sec. | 2 sec. | 3 sec. |
| Uncompressed (120 Mbps) | Streetcar | 7% | 20% | 37% |
| | Harbor Scene | 7% | 13% | 20% |
| | Whale Show | 3% | 17% | 33% |
| 6 Mbps | Streetcar | 3% | 10% | 20% |
| | Harbor Scene | 0% | 7% | 10% |
| | Whale Show | 0% | 0% | 3% |
| 3 Mbps | Streetcar | 3% | 3% | 10% |
| | Harbor Scene | 0% | 3% | 3% |
| | Whale Show | 0% | 3% | 3% |

6.7.3 処理速度

提案方式における端末上の電子透かし検出処理は 1 フレーム当たり平均 16.4 ミリ秒で動作し（比較のため PC（3.4 GHz Pentium 4）で計測した処理時間は平均 1.3 ミリ秒であった），プレビュー画面描画やフィードバック出力などの負荷を合わせると平均 24.7 ミリ秒であった．これはフレームキャプチャレート 14.98 FPS

のフレームキャプチャ間隔66.7ミリ秒に十分に間に合い、電子透かし検出処理を行なってもフレーム落ちは生じずにリアルタイム処理が可能であった。これにより提案方式は要件(c)を満たすものであるといえる。なお、従来方式における検出処理時間は1フレーム当たり平均11.7ミリ秒、画面描画などを合わせると平均20.0ミリ秒であり、提案方式では若干処理量が増加しているが、7.2節で述べたロバスト性の大幅な向上と併せて考えれば提案方式は十分に有効であるといえる。

6.8 本章のまとめ

映像向けモバイル電子透かしサービスのための、ロバストで高速な映像向け電子透かし方式を提案した。電子透かし手法としては、時間同期不要であり高いロバスト性を有する単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法) を示し、さらにそれを画素信号領域を対象とするように改良して高速化を図った。さらに提案方式における電子透かし検出の定量的信頼性評価方法について示した。実機への実装および評価実験により、モバイル電子透かしサービス実現のための全ての要件をほぼ満たすことを検証し、提案方式の有効性を確認した。また、従来方式と比較して大幅なロバスト性の向上を実現し、課題であった端末性能依存性も解消した。これにより映像向けモバイル電子透かしサービスの幅広い展開に寄与できる。

今後の検討課題として、まず透かし情報長の拡大が挙げられる。また、CRTやLCDなど、PDP以外の表示デバイスを用いた場合の画質及び耐性評価により、提案手法の適用領域の広さを確認することも必要である。

第7章 結論

本論文では、画像や映像といったコンテンツに対して、高度なコンテンツ利用環境の実現に不可欠となるメタデータを、コンテンツ自体と結びつける（バインディング）ための電子透かし技術について提案を行った。特に印刷や画面出力など、アナログ出力されたコンテンツにおいてまでメタデータとのバインディングをシームレスに保証し、アナログドメインで流通するコンテンツを起点として高度なコンテンツ利用環境を享受可能とすることを目的として検討を行った。

また、アナログドメインのコンテンツの入力デバイスとして、近年幅広く普及したカメラ付き携帯電話機の利用について深く検討を行った。一般に電子透かし処理は複雑な画像・映像処理であり、携帯電話機のような計算リソースの乏しい環境では、高速処理とアナログ出力耐性を同時に実現することは従来非常に困難であった。本研究では特にこの点について注目し、課題の解決について検討を行った。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、論文の構成を概観した。

第2章では、本研究に関連する技術及び研究について、電子透かし以外のアプローチとの比較を行って電子透かしアプローチの特徴を示した。また、従来の電子透かし技術について調査を行い、本研究で取り扱う技術的課題についてより詳細かつ具体的な整理を行った。

第3章では、カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの関連情報取得システム実現への予備検討として、PCでの動作を前提としたアナログ出力耐性を有する静止画電子透かし手法を用いたクライアント／サーバ方式について検討を行った。まず、アナログ出力耐性を有する電子透かし手法として、画像の空間周波数成分に対して直交符号化された透かし情報を重畳する静止画向け電子透かし手法を示す。提案手法では画像の空間周波数成分（フーリエ係数）の実部と虚部を独立したチャネルとみなして埋め込みを行うことによって、従来手法であるフーリエ係数の振幅に埋め込みを行う手法に対して拡散率を倍増させることが可能であり、それにより高いノイズ・圧縮耐性を実現した。また、False Positiveについて定量化を行った。評価実験により、印刷出力されたアナログ画像からでも電子透かしの検出が可能であることを確認した。最後に、提案手法を利用したC/Sシステムについて検討を行い、応答時間の短縮のためにはスタンドアロン検出が必

要であることを述べた。

第4章では、第3章で示したC/S方式における通信処理に伴うコスト問題を本質的に解決するため、カメラ付き携帯電話機上でスタンドアロン処理で高速に検出処理が可能な静止画電子透かし方式について示した。提案方式は画像の縁を利用して撮影角度によって生じる幾何歪みの補正をすることで空間同期をとり、さらに安定した特性を有する2次元ブロックパターン変調を用いることに微小な幾何歪みに対処し、スペクトラム拡散変調によりノイズに対するロバスト性を実現を図った。さらに、実サービス運用上必要となる、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法 (False Positive, Message Error) についても示した。実機に実装して行った評価実験によって、提案手法は携帯電話機上のJavaアプリケーションとして実装した場合でも、700msec. 程度で電子透かし検出処理を完了することができ、また、十分なロバスト性を有することを確認できた。

第5章では、対象を動画へと変え、ディスプレイ上で再生されている動画から、カメラ付き携帯電話機を用いてリアルタイムに検出処理可能な高速な動画向け電子透かし方式について示した。提案方式は、第4章の方式と同じくキャプチャフレーム中の矩形領域をリアルタイムに検出・追跡することで、フリーハンド撮影によって刻々と撮影角度による幾何歪みに対処して空間同期を実現した。電子透かし検出は、連続してキャプチャされるビデオフレームの時間差分をとることで原画成分を抑圧してS/N比を改善することにより、スペクトラム拡散された電子透かし信号をロバストに可能である。さらに第4章と同じく、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法 (False Positive, Message Error) についても示した。実機に実装して行った評価実験により、画面表示された動画にカメラ付き携帯電話機をかざしてリアルタイムにかつロバストに検出可能であることを確認できた。これにより、携帯電話機上でカメラキャプチャ画像からのリアルタイム検出 (携帯電話機上のキャプチャレート 15FPS(フレーム間隔 66msec.) に十分に間に合い処理落ちしない) が可能な動画電子透かし技術を世界で初めて実現したことになる。

第6章では、第5章で示した方式の問題であった電子透かし手法の端末性能依存性を解消しつつ、さらなる耐性向上を実現するリアルタイム検出処理可能な高速動画向け電子透かし方式について示す。提案方式では、空間同期については第5章の方式と同じく高速矩形検出・追跡手法によって実現される。電子透かし手法としては、時間同期不要であり高いロバスト性を有する単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法) を示し、さらに画素信号領域を対象とするように改良して高速化を図った。さらに第4,5章と同じく、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法についても示す。実機に実装し

て行った評価実験により、提案手法は第5章の方式で問題であった端末性能依存性を解消すると同時に、ロバスト性の大幅な向上を実現することを確認できた。これにより電子透かしを用いたサービスの幅広い展開を実現することが可能である。

本研究の成果は、アナログ出力された実世界の画像・動画コンテンツから電子透かし検出可能な高耐性かつ高速な電子透かし手法を提案し、特にカメラ付き携帯電話機上でスタンドアロン検出処理を可能とする高速性を有すること及び高いロバスト性を有することを、実機を用いた評価実験により実証したこと、さらに、検出透かし情報の信頼性の定量評価方法を示し、実サービス運用時定量的品質保証を可能としたことにある。

謝辞

本論文は、様々な方々のお力添えのもとに完成いたしました。

はじめに、本論文の主査であり、主任指導教官でもありました国立情報学研究所／総合研究大学院大学の曾根原登教授におかれましては、本研究全般に関して多大な御指導と御鞭撻を賜りました。日本電信電話株式会社御在職時より10年間の長きに渡り、本研究の機会を与えていただいたこと、総合研究大学院大学での御指導をお引受けいただいたこと、また、本研究をまとめるにあたり幾度となく挫けそうになったときも叱咤激励とともに我慢強くご支援くださったことなど、先生の御指導なくしては本研究は成し得ないものでありました。心より厚く御礼申し上げます。

また本論文をまとめるにあたり、論文審査委員の先生方からも多大な御指導と御鞭撻を賜りました。計宇生准教授におかれましては、研究内容の至らない点について常に親切な御指摘、御指導を賜り励ましていただいたこと、深く感謝いたします。佐藤真一教授におかれましては、画像処理に関する深い知見に基づいた御指摘とともに、本質を捉えた御指導を賜りましたこと、深く感謝いたします。東倉洋一教授におかれましては、非常に幅広く深い見識に基づいて、本研究遂行に関する本質を捉えた御指摘、御指導を賜りましたこと、深く感謝いたします。山田茂樹教授におかれましては、研究論文をまとめるにあたり鋭く重要な御指摘をいただきましたこと、深く感謝いたします。安田浩教授におかれましては、非常にお忙しい中、お時間を割いていただき様々な御指摘、御指導をいただきましたこと、深く感謝いたします。皆様の御指導、御鞭撻により本論文をまとめ、より質の高いものとすることができました。重ねて御礼申し上げます。

また、本研究の機会を与えて下さり、御指導、御鞭撻を賜った、日本電信電話株式会社の多くの方々に心より感謝いたします。特に、NTTサイバーソリューション研究所の一之瀬進元所長（現NTTアイティ（株））、NTTサイバースペース研究所の長谷雅彦元所長、南部明所長、藤生宏元プロジェクトマネージャ（現NTTアドバンステクノロジー（株））、石橋聡プロジェクトマネージャの御理解と御鞭撻は、本論文をまとめるうえで大きな支えとなりました。厚く御礼申し上げます。さらに、山室雅司氏、宮地寿人氏（現NTT東日本（株））、小池秀樹氏、高嶋洋一氏、

片山淳氏，川村春美氏，小川宏氏，宮武隆氏，山本奏氏（現 NTT 西日本（株）），北原亮氏をはじめとした NTT 研究所の皆様，並びに国立情報学研究所／総合研究大学院大学曾根原研究室の皆様には，日頃の御討論，御指導，御鞭撻を賜りましたこと，深く感謝いたします。

最後に，心の支えとなり元気づけてくれた家族に感謝します。

参考文献

- [1] RDF Site Summary (RSS) 1.0 Official Specification,
<http://web.resource.org/rss/1.0/>
- [2] RSS 2.0 Specification, <http://www.rssboard.org/rss-specification>
- [3] 曾根原登, 岸上順一, 赤埴淳一編著, メタデータ技術とセマンティックウェブ, 東京電機大学出版局, ISBN:978-4501540609, 2006.
- [4] I.J.Cox, J.Kilian, T.Leighton, and T.Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for images, audio, and video", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Image Processing, pp. 243–256, 1996.
- [5] T. Nakamura, H. Ogawa, A. Tomioka, and Y. Takashima, "Improved Digital Watermark Robustness against Translation and/or Cropping of an Image Area", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E83-A, No. 1, Jan. 2000.
- [6] I.J.Cox, M.L.Miller, and J.A.Bloom, DIGITAL WATERMARKING, Morgan Kaufmann Publishers, ISBN:1-55860-714-5, 2002.
- [7] , H.Fujii, H.Sakamoto, S.Irie, and H.Yamashita, "Watermark Resolution," Proc. ICME 2001, pp. 437–440, 2001.
- [8] cIDf仕様書, <http://www.cidf.org/>
- [9] 安田浩, 安原隆一監修, コンテンツ流通教科書, (株)アスキー, ISBN:4-7561-4306-7, 2003.
- [10] 入江幸子, 藤井寛, 阪本秀樹, 山下博之, "電子透かしを利用したコンテンツIDのアプリケーション", 情報処理学会研究報告, 2000-EIP-10-2, Vol.2000, No.109, pp.7–14, 2000.
- [11] 片山淳, 外波雅史, 木村 司, 山下博之, "コンテンツを起点に電子商取引に誘導するサービス仲介ゲートウェイ", NTT 技術ジャーナル, Vol.14, No.10, pp.24–27, 2002.

- [12] H. Sakamoto, H. Fujii, S. Irie, and H. Yamashita, "Service Gateway to Enable the Introduction of Content Related Services," Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME) 2001, pp. 637–640, 2001.
- [13] A.M.Alattar, "Bridging Printed Media and the Internet via Digimarc's Watermarking Technology," 8th ACM Int'l Multimedia Conf, Nov. 4, 2000.
- [14] 総務省, 平成 17 年度情報通信白書, 2006.
- [15] 光山奈保子, "カメラ付きケータイの販売台数, 2005 年に世界で 3 億台に", <http://it.nikkei.co.jp/mobile/news/index.aspx?n=MMITfa083022122005>, 2005.
- [16] A.Herrigel, J.Ó Ruanaidh, H.Petersen, S.Pereira and T.Pun, "Secure Copyright Protection Techniques for Digital Images", Proc. 2nd Workshop on Information Hiding, pp.169–190, 1998.
- [17] 中村晴幸, 合志清一, 藤井亮介, 伊藤浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷愉佳里, "CRT 再撮耐性を有する電子透かし", 映メ学会誌, Vol. 60, No. 11, pp. 1778–1788, 2006.
- [18] J. Haitsma and T. Kalker, "A Watermarking Scheme for Digital Cinema," Proc. ICIP, vol. 2, pp. 487–489, 2001.
- [19] J. Lubin, J. A. Bloom and H. Cheng, "Robust, Content-Dependent, High-Fidelity Watermark for Tracking in Digital Cinema," Security and Watermarking of Multimedia Contents V, Proc. SPIE, vol. 5020, pp. 536–545, 2003.
- [20] 越前功, 吉浦裕, 安細康介, 佐々木良一, "分布推定手法を用いた電子透かしの検出誤り確率推定方式", 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.8, pp.2006–2016, 2001.
- [21] QR Code.com, <http://www.qrcode.com/>
- [22] 村松健晴, 諏訪昭夫, 三木一茂, "カメラ付き携帯電話の QR コード技術", シャープ技報, Vol.87, No.10, pp.49–53, 2003.
- [23] J. Rekimoto and Y. Ayatsuka, "CyberCode: Designing Augmented reality Environments with Visual Tags," Designing Augmented Reality Environments (DARE 2000), 2000.

- [24] Toshiaki Iso, Shoji Kurakake, Toshiaki Sugimura, "Visual-Tag Reader: Image Capture by Cell Phone Camera," Proc. ICIP2003, vol. III pp.557-560, 2003.
- [25] 宮奥健人, A.Tang, S.Fels, "C-Band: 柔軟なカラー環状タグシステム", インタラクション 2006 予稿集, pp.3-10, 2006.
- [26] 中村高雄, 片山淳, 山室雅司, 曾根原登, "カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式", 信学論 D-II, Vol. J87-D-II, No.12, pp.2145-2155, 2004.
- [27] 野田嗣男, 師尾潤, 千葉広隆:印刷型ステガノグラフィ技術, FUJITSU, No.57, Vol.3, pp.320-324, 2006.
- [28] H.Tarumi, K.Morishita, M.Nakao, and Y.Kambayashi, "SpaceTag: An Overlaid Virtual System and its Application", Proc. Int'l Conf. on Multimedia Computing and Systems(ICMCS 99), vol. 1, pp. 207-212, 1999.
- [29] eMarker, [http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/ Press Archive/200012/00-61b/](http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/PressArchive/200012/00-61b/)
- [30] 坂村健, "ユビキタス ID センター", 総務省ユビキタスネットワーク時代における電子タグの高度利活用に関する調査研究会 (第 2 回会合) 配付資料 2-4, 2003.
- [31] 前田幹夫, 梅津圭一, 篠原弘樹, 稲垣良男, 南浩樹, "映像情報メディア年報 2-1 放送技術", 映メ学会誌, Vol.60, No. 8, pp.1194-1199, 2006.
- [32] 白井吉成, 松下光範, "IR プロジェクトを用いた実環境への情報提示手法の提案", 情報科学技術フォーラム FIT2003, LK-010, pp.287-289.2003.
- [33] 北村 匡彦, 苗村 健, "DMD を用いた空間分割型可視光通信の基礎検討", 情報科学技術フォーラム FIT2006 情報科学技術レターズ, vol.5, LK-010, pp. 293 - 295, 2006.
- [34] 黒住隆行, 柏野邦夫, 村瀬洋, "携帯カメラで収録した映像をキーとする一致映像探索", 信学技報 PRMU2002-130, pp.7-11, 2002.
- [35] 高田智規, 阿部剛仁, 川村春美, "複数の順序情報を用いたコンテンツ識別手法", 第 13 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.267-272, 2005.

- [36] 阿部剛仁, 高田智規, 川村春美, "コンテンツ識別のための特徴量抽出手法に関する一考察", 第13回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.408-413, 2005.
- [37] 中村高雄, 高嶋洋一, "知っておきたいキーワード 電子透かし", 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 7, pp. 948-950, 2007.
- [38] W.Bender,D.Gruhl,N.Morimoto,and A.Lu, "Techniques for Data Hiding," IBM Systems Journal, 35(3/4), pp.313-336,1996.
- [39] M.Barni and F.Bartolini, "Watermarking Systems Engineering," Marcel Dekker Inc., 2004.
- [40] E.T.Lin, C.I.Podilchuk, and E.J.Delp, "Detection of Image Alterations Using Semi-fragile Watermarks," SPIE-3971, pp.152-163, 2000.
- [41] 栗林稔, 森井昌克, 田中初一, "予測符号化を用いた可逆電子透かし, 情報処理学会研究報告, 2005-CSEC-30-(58), Vol.2005, No.70, pp.409-414, 2005.
- [42] 松井, 高嶋, "電子透かしの応用: 一般利用者の協力に基づく海賊版データ摘発方法", 1998 暗号と情報セキュリティシンポジウム講演論文集, SCIS98-10.2.C, 1998.
- [43] 玉井誠, 山本具英, 三宅延久, 藤井寛, 中村高雄, "著作権保護を考慮した情報流通システム InfoProtect", NTT 技術ジャーナル, Vol. 10, No. 7, pp. 23-25, 1998.
- [44] 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, "デ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", 1997年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS97-26A, 1997.
- [45] T. Nakamura, H. Ogawa, and Y. Takashima, "A Watermark Technique for Still Image, NTT Review", Vol. 11, No. 1, pp. 124-128, January 1999.
- [46] 大西, 松井, 小澤, "ウェーブレット変換を利用したクリップ画像からの電子透かし認証", 映像メディア学技報, vol.21, no.42,MIP'97-55, pp.1-5, 1997.
- [47] A.Z. Tirkel, G.A. Rankin, R.M. van Schyndel, N.R.A. Mee, C.F. Osborne, "Electronic Water Mark", Digital Image Computing, Technology and Applications (DICTA-93), pp. 666-672, 1993.

- [48] 横山光雄, スペクトラム拡散通信システム, 科学技術出版社 1988.
- [49] A. Piva, M. Barni, F. Bartolini, and V. Cappellini, "DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image," Proc. ICIP'97, Vol.1, p. 520, 1997.
- [50] M.Kutter, "atermarking resisting to translation, rotation, and scaling," Proc. SPIE Multimedia Systems and Applications, Vol. 3528, pp. 423-431, 1998.
- [51] S.Pereira and T.Pun, "Robust template matching for affine resistant image watermarks, " IEEE Trans. Image Processing, Vol, 9, No. 6, pp. 1123-1129, 2000.
- [52] J.ÓRuanaidh and T.Pun, "Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking," Signal Processing, Vol.66, No.3, pp.303-317, 1998.
- [53] S.Pereira, J.ÓRuanaidh, F.Deguillaume, G.Csurka, and T.Pun, "Template Based Recovery of Fourier-Based Watermarks Using Log-polar and Log-log Maps," Proc. ICMCS'99, Vol.1, pp.870-874, 1999.
- [54] 鈴置昌宏, 渡辺創, 嵩忠雄, "デジタル動画像に対する著作権保護の一手法—不正コピーを行なったユーザを特定する手法—", 信学技報 IT95-52, Vol.95, No.590, pp.13-18, 1996.
- [55] J. Dittmann, M. Stabenau, R. Steinmetz, "Robust MPEG VideoWatermarking Technologies," Proc. ACM MM '98, pp. 71-80, 1998.
- [56] F. Hartung and B. Girod, "Watermarking of uncompressed and compressed video," Signal Processing, vol. 66 no. 3 pp. 283-301, 1998.
- [57] G. Doërr and J.-L. Dugelay, "A guide tour of video watermarking," Signal Processing: Image Communication, Vol. 18, pp. 263-282, 2003.
- [58] H. Ogawa, T. Nakamura, A. Tomioka, and Y. Takashima, "Digital Watermarking Technique for Motion Pictures Based on Quantization," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E83-A, No.1, pp. 77-89, January 2000.
- [59] 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, "フレーム間を考慮した電子透かし方式の有効性", '97 信学秋全大シンポジウム講演, SA-7-6, 1997.

- [60] F. Deguillaume, G. Csurka, J. O'Ruanaidh, and T. Pun, "Robust 3D DFT Video Watermarking," Proc. SPIE, Vol. 3657, pp. 113-124, 1999.
- [61] 小林洋士, 岩田基, 荻原昭夫, 汐崎陽, "時間軸方向の周波数成分を用いた動画用電子透かし", 2005 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム SCIS 2005 予稿集, 2C4-4, pp.871-876, 2005.
- [62] Y.Lee, H.Jung, and S.Lee, "Multi-bit video watermarking based on 3D DFT using perceptual models," Proc. IWDW2003 (LNCS2939), pp. 301-315, 2004.
- [63] E.T.Lin and E.J.Delp, "Temporal synchronization in video watermarking," IEEE Trans. Signal Processing, Vol.52, No.10, pp. 3007-3022, 2004.
- [64] 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 動画像電子透かしの耐性向上における正規化フレームサイズの有用性について, '99 情処秋全大, 3X-10, No. 4, pp. 257-258, 1999.
- [65] 馬養浩一, 伊藤浩, 鈴木光義, 浅井光太郎, "アナログ耐性を持つ電子透かし", 画像電子学会誌, Vol.33, No.5, pp.783-791, 2004.
- [66] 山下武士, 宮崎明雄, "スクリーンの撮影に対してロバストな電子透かし方式の検討(その2)", 2004 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム SCIS 2004 予稿集, 3D4-3, 2004.
- [67] 師尾潤, 野田嗣男, "印刷画像用データ埋め込み技術", 2003 画像電子学会年次大会一般セッション 3, pp.5-6, 2003.
- [68] 水本匡, 松井甲子雄, "DCT を用いた電子透かしの印刷取り込み耐性の検討", 信学論 A, Vol. J85-A, No.4, pp.451-459, 2002.
- [69] 江島將高, 井上尚, 乗富賢一, 吉田裕之, "印刷画像に対する電子透かし方式", 2005 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム SCIS 2005 予稿集, 2C3-1, pp.715-720, 2005.
- [70] 中村桂介, 岩切宗利, 松井甲子雄, "電子透かしの非線形変換耐性にけんする一検討", コンピュータセキュリティシンポジウム CSS2002 予稿集, pp.443-448, 2002.
- [71] 田中宏征, 中嶋 正臣, "幾何学的改変に対する周波数変換利用型電子透かしの耐性強化手法", 情処研報, 98-CSEC-3-7, Vol. 98, No.208, pp.37-42, 1998.

- [72] 片山淳, 中村高雄, 山室雅司, 曾根原登, "電子透かし読み取りのためのiアプリ高速コーナー検出アルゴリズム", 信学論D-II, Vol. J88-D-II, No. 6, pp. 1035-1046, 2005.
- [73] J.K.Su, F.Hartung, and B.Girod, "Digital Watermarking of Text, Image, and Video Documents," Computers & Graphics 22(6), 1998.
- [74] 中村, 片山, 宮地, 山下, 山室, "カメラ付き携帯電話機を用いたサービス仲介システムのための電子透かし検出方式", 情報科学技術フォーラム FIT2003, N-020, pp.409-410, 2003.
- [75] Specifications of Java for i-mode,
<http://www.nttdocomo.co.jp/english/p.s/i/index.html>
- [76] B.Shneiderman, Designing the user interface 3rd edition, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., 1998.
- [77] F.J.MacWilliams and N.J.A.Sloane, The Theory of Error Correcting Codes, North-Holland Publishing, 1977.
- [78] 今井, 符号理論, (社) 電子情報通信学会, 東京, 1990.
- [79] T. Nakamura, A. Katayama, M. Yamamuro, and N. Sonehara, "Fast Watermark Detection Scheme from Camera-captured Images on Mobile Phones," Int'l J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (IJPRAI), Vol. 20, No. 4, pp. 543-564, 2006.
- [80] 山本基夫, 岩田基, 荻原昭夫, 汐崎陽, "フレーム間の類似性を利用した動画像相関型電子透かしの時系列攻撃への対処法", 2005年暗号と情報セキュリティシンポジウム SCSI2005 予稿集, 2C4-3, pp.865-870, 2005.
- [81] 中村高雄, 宮武隆, 林良一, 片山淳, 山室雅司, "カメラ入力画像からのリアルタイム電子透かし検出方式", 情報科学技術フォーラム FIT2004, J-036, 2004.
- [82] 北原亮, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之: 携帯端末上における幾何補正のためのリアルタイム矩形追跡手法, 電子情報通信学会技術報告 OIS2006-46, Vol.106, No.353, pp.1-6, 2006.
- [83] 樋渡涓二編, 画像工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.10-59, 1986.

- [84] ITE Standard Test Sequence,
http://www.ite.or.jp/products/testchart_index.html
- [85] FFMPEG, <http://ffmpeg.sourceforge.net/>
- [86] 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, 安野貴之, 曾根原登, リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし, 画像電子学会誌, Vol.36, No.4, pp. 426-434, 2007.
- [87] 山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性を持つ動画電子透かし", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.7, pp.1755-1764 (2007).
- [88] 山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性を持つ動画電子透かし", 情報科学技術フォーラム FIT2006 情報技術レターズ, LJ-009, pp. 251-254, 2006.
- [89] 坂田晴夫, "視覚の色度の時間周波数特性-色差弁別しきい-", 信学論 A, Vol.J63-A, No.12, pp.855-861,1980.

研究業績

学術論文 (全て査読有)

【総研大入学以後の主著】

1. T. Nakamura, A. Katayama, M. Yamamuro, and N. Sonehara, "Fast Watermark Detection Scheme from Camera-captured Images on Mobile Phones," Int'l J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (IJPRAI), Vol. 20, No. 4, pp. 543-564, 2006.
2. T. Nakamura, A. Katayama, R. Kitahara, and K. Nakazawa, "A Fast and Robust Digital Watermark Detection Scheme for Cellular Phones," NTT Technical Review, Vol. 4, No. 3, pp. 57-63, 2006.
3. 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, 安野貴之, 曾根原登, "リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし", 画像電子学会誌, Vol.36, No.4, pp. 426-434, 2007.
4. 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 片山淳, 安野貴之, 小池秀樹, 曾根原登, "SFPSS法に基づくリアルタイム検出可能な映像向けモバイル電子透かし", 情報処理学会論文誌ジャーナル, (採録決定)

【上記以外】

5. T. Nakamura, H. Ogawa, A. Tomioka, and Y. Takashima, "Improved Digital Watermark Robustness against Translation and/or Cropping of an Image Area," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E83-A, No.1, pp. 68-76, January 2000.
6. 中村高雄, 片山淳, 山室雅司, 曾根原登, "カメラ付き携帯電話機を用いたアナログ画像からの高速電子透かし検出方式", 信学論 D-II, Vol. J87-D-II, No. 12, pp. 2145-2155, 2004.

7. H. Ogawa, T. Nakamura, A. Tomioka, and Y. Takashima, "Digital Watermarking Technique for Motion Pictures Based on Quantization," IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E83-A, No.1, pp. 77–89, January 2000.
8. 片山淳, 中村高雄, 山室雅司, 曾根原登, "電子透かし読み取りのための i アプリ高速コーナ検出アルゴリズム", 信学論 D-II, Vol. J88-D-II, No. 6, pp.1035–1046, 2005.
9. 山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性を持つ動画電子透かし", 信学論 D, Vol.90, No.7, pp. 1755–1764, 2007.
10. T. Nakanishi, T. Nakamura, N. Sonehara, and Y. Tohkura, "Curated consumption infrastructure prototyping and its evaluation for video sharing archive based on persistent usage scenario association technology," Int. J. Service Operations and Informatics, (採録決定)

国際会議・査読付き講演・レター等 (全て査読有)

【総研大入学以後の主著】

1. 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, "リアルタイム検出可能な動画向けモバイル電子透かし", 第 13 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.161–166, 2005.
2. Takao Nakamura, Susumu Yamamoto, Ryo Kitahara, Atsushi Katayama, Takayuki Yasuno and Noboru Sonehara, "A Fast, Robust Watermark Detection Scheme for Captured Videos on Camera Phones," Proc. IEEE ICME2007, pp. 316–319, Beijing, China, Jul. 2007.

【上記以外】

3. T. Nakamura, A. Katayama, M. Yamamuro, and N. Sonehara, "Fast Watermark Detection Scheme for Camera-equipped Cellular Phone," Proc. Int'l Conf. of Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM2004), pp.101–108, College Park, Maryland, Oct. 2004.

4. T. Moriya, T. Takashima, T. Nakamura, and N. Iwakami, "Digital Watermarking Schemes Based On Vector Quantization," Speech Coding For Telecommunications Proceeding, 1997, 1997 IEEE Workshop on 7-10 Sept. 1997 pp. 95-96, 1997.
5. H. Sakamoto, M. Yamada, T. Nakamura, and T. Nakanishi, "Additional Content-Related Service/Product Offering System based on New Standards: MPEG-21 and ContentID/DOI," 2002 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME '02) Proceedings. Volume 2, pp. 329-332, Aug. 2002.
6. A. Katayama, T. Nakamura, M. Yamamuro, and N. Sonehara, "New High-speed Frame Detection Method: Side Trace Algorithm (STA) for i-appli on Cellular Phones to Detect Watermark," Proc. Int'l Conf. of Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM2004), pp.109-116, College Park, Maryland, Oct. 2004.
7. 山本奏, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, "単一周波数平面スペクトル拡散を利用した時間同期外し耐性を持つ動画電子透かし", 情報科学技術フォーラム FIT2006, LJ-009, pp. 251-254, 2006.

紀要等

1. 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, 静止画像に対する電子透かし, NTT R&D, Vol. 47, No.6, pp. 711-714, 1998.
2. T. Nakamura, H. Ogawa, and Y. Takashima, A Watermark Technique for Still Image, NTT Review, Vol. 11, No. 1, pp. 124-128, January 1999.
3. 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, 動画電子透かし技術, NTT R&D, Vol. 47, No.6, pp. 715-718, 1998.
4. H. Ogawa, T. Nakamura, and Y. Takashima, A Watermark Technique for Motion Pictures, NTT Review, Vol. 11, No. 1, pp. 129-133, January 1999.

解説記事等

1. 中村高雄, 山田正紀, 仲西正, 山下博之, デジタルコンテンツ流通を促進するマルチメディアフレームワーク MPEG-21 の国際標準化, NTT 技術ジャーナル, Vol. 14, No.10, pp. 32-35, 2002.
2. 中村高雄, 高嶋洋一, 知っておきたいキーワード 電子透かし, 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 7, pp. 948-950, 2007.
3. 玉井誠, 山本具英, 三宅延久, 藤井寛, 中村高雄, 著作権保護を考慮した情報流通システム InfoProtect, NTT 技術ジャーナル, Vol. 10, No. 7, pp. 23-25, 1998.
4. 山中喜義, 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, 曾根原登, 著作権保護技術の動向ーコンテンツリサイクルマート創出の基盤技術ー, 情報処理学会誌, Vol. 41, No.4, 2000.

学術講演・研究報告等

1. 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, デ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, 1997年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS97-26A, 1997.
2. 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, 画像の周波数領域処理による電子透かし, '97 信学春全大, D-11-47, 1997.
3. 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, 画質を考慮した電子透かし, '97 信学秋全大シンポジウム講演, SA-7-3, 1997.
4. 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, 画像のエッジ成分を利用した周波数領域への電子透かし, '98 信学春全大, D-11- 59, 1998.
5. 中村高雄, 小川宏, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 電子透かしにおける平行移動・切り取り耐性向上の一手法, 1999年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS99-W3-2.1, pp. 193-198, 1999.
6. 中村高雄, 片山淳, 宮地寿人, 山下博之, 山室雅司, カメラ付き携帯電話機をもちいたサービス仲介システムのための電子透かし検出方式, 情報科学技術フォーラム FIT2003, N-020, pp.409-410, 2003.

7. 中村高雄, 宮武隆, 林良一, 片山淳, 山室雅司, カメラ入力画像からのリアルタイム電子透かし検出方式, 情報科学技術フォーラム FIT2004, J-036, pp. 284-286, 2004.
8. 中村高雄, 山本奏, 北原亮, 宮武隆, 片山淳, カメラ付き携帯電話機を用いた動画向けリアルタイム電子透かし検出方式, 情報科学技術フォーラム FIT2005, J-028, 2005.
9. 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, DCTを用いたデジタル動画像における著作権情報埋め込み方法, 1997年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS97-31G, 1997.
10. 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, DCTを用いたデジタル動画像への著作権情報埋め込み方法, '97信学春全大, D-11-84, 1997.
11. 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, フレーム間を考慮した電子透かし方式の有効性, '97信学秋全大シンポジウム講演, SA-7-6, 1997.
12. 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, 電子透かしを用いたデジタル動画像の著作権保護方式, 情処秋全大, 6Q-2, 1997.
13. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 電子透かしにおける抽出情報の信頼性に関する検討, '98信学秋全大, D-11- 48, 1998.
14. 富岡淳樹, 中村高雄, 小川宏, 高嶋洋一, マルチチャネルデジタルオーディオに対する電子透かし, '98信学秋全大, D-14-4, 1998.
15. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 統計的手法を用いた電子透かし情報の信頼性評価について, '98情処秋全大, 3D-8, No.4, pp. 234-235, 1998.
16. 富岡淳樹, 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, 電子透かしにおける鍵管理問題に関する一考察, '98情処秋全大, 3D-9, No.4, pp. 236-237, 1998.
17. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 信頼性に基づく動画像電子透かし抽出方法, 1999年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS99-W4-2.5, pp.325-330, 1999.
18. 富岡淳樹, 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, 音声電子透かしのパラメータの最適化について, 1999年暗号と情報セキュリティシンポジウム, SCIS99-W4-2.7, pp. 337-342, 1999.

19. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 画質を考慮した電子透かし埋め込み方法, 信学技報 CQ98-81, pp.19-24, 1999.
20. 富岡淳樹, 小川宏, 中村高雄, 高嶋洋一, 音声電子透かしのパラメータ最適化について, 信学技報 CQ98-82, pp. 25-30, 1999.
21. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 電子透かし読み取り方法への軟判定復号技術の適用, '99 信学春全大, D-11- 40 , 1999.
22. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 動画像電子透かしの耐性向上における正規化フレームサイズの有用性について, '99 情処秋全大, 3X-10, No. 4, pp. 257-258, 1999.
23. 坂本昌史, 中村高雄, 小川宏, 富岡淳樹, 松浦由美子, 高嶋洋一, ベクトルデータへの電子透かしの一方式, '99 情処秋全大, 3X-9, No.4, pp. 255-256, 1999.
24. 小川宏, 中村高雄, 富岡淳樹, 高嶋洋一, 係数量子化とスペクトル拡散法の組み合わせによる動画像電子透かしの耐性強化について, 2000 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム, D-28, 2000.
25. 山本奏, 堀岡力, 中村高雄, 高嶋洋一, 小川宏, プライバシを考慮したブラインド電子透かしシステムの一手法, 2000 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム, C-13, 2000.
26. 角越和也, 小川宏, 中村高雄, 坂本昌史, 高嶋洋一, 制御フロー構造を保った変換にロバストなプログラム電子透かしの一手法, 2000 年信学春全大, A-7-16, 2000.
27. 山田正紀, 中村高雄, 阪本秀樹, MPEG-21 におけるコンテンツ流通の標準化及び検証実験, 2002 信学全大春,
28. 鹿志村浩史, 石井真之, 吉浦裕, 越前功, 中村高雄, 田平卓之, 原田綱一, 佐々木良一, 2 階層電子透かしの提案と評価, コンピュータセキュリティシンポジウム CSS2002, 3B, pp. 125-129, 2002.
29. 片山淳, 中村高雄, 山室雅司, 色空間範囲を考慮した電子透かし埋め込み方法の検討, 情報科学技術フォーラム FIT2004, J-035, pp. 283-284, 2004.
30. 曾根原登, 宮地寿人, 片山淳, 中村高雄, 阿部剛仁, デジタル著作権の技術・法・経済 d-commerce の展開, 国立情報学研究所公開講演会, 2004.

31. 北原亮, 片山淳, 中村高雄, 辺と隅の幾何学的特徴を用いた高速矩形領域抽出手法, 情報科学技術フォーラム FIT2005, J-027, 2005.
32. 山本奏, 中村高雄, 高嶋洋一, 片山淳, 北原亮, 宮武隆, フレーム重畳型動画電子透かしの検出性能評価に関する一考察, 情報科学技術フォーラム FIT2005, J-029, 2005.
33. 北原亮, 中村高雄, 片山淳, 安野貴之, 携帯端末上における幾何補正のためのリアルタイム矩形追跡手法, 信学技報 Vol.106 No.351 ISEC2006-88 pp.1-6, 2006.

登録特許

【国内】

1. 特許第 003354880 号, 情報多重化方法, 情報抽出方法および装置
2. 特許第 003412117 号, 量子化の符号化パラメータを用いる電子すかし作成方法およびその読出し方法
3. 特許第 003423585 号, 画像処理方法および装置
4. 特許第 003469454 号, 画像処理方法および装置
5. 特許第 003470856 号, 画像処理方法および装置
6. 特許第 003534577 号, 情報多重化方法, 情報抽出方法及びそれらの装置
7. 特許第 003536890 号, 情報多重化方法及び情報抽出方法
8. 特許第 003536891 号, 情報多重化方法及び情報抽出方法
9. 特許第 003566924 号, 電子透かし埋め込み方法, 検出方法, 電子透かし埋め込み装置, 検出装置および電子透かし埋め込みプログラムを記録した記録媒体, 検出プログラムを記録した記録媒体
10. 特許第 003585697 号, 情報抽出方法及びその装置
11. 特許第 003589111 号, 電子透かし方法及びその装置
12. 特許第 003589832 号, 情報多重化方法及び情報抽出方法

13. 特許第 003601566 号, 情報多重化方法および著作権保護システム
 14. 特許第 003633488 号, 電子透かし読み取り方法及び装置及び電子透かし読み取りプログラム及び電子透かし読み取りプログラムを格納した記憶媒体
 15. 特許第 003654263 号, 電子透かし埋込方法及び装置及び電子透かし埋込プログラムを格納した記憶媒体
 16. 特許第 003656728 号, 電子透かしを用いた情報埋め込み方法および抽出方法
 17. 特許第 003745729 号, 電子透かし埋め込み方法及び電子透かし検出方法及び電子透かし埋め込み装置, 及び電子透かし検出装置, 及び電子透かし埋め込みプログラムを格納した記憶媒体, 及び電子透かし検出プログラムを格納した記憶媒体, 及び電子透かしシステム
 18. 特許第 003780510 号, 多重電子透かし処理方法, 多重電子透かし処理装置, 並びに多重電子透かし処理プログラム及びその処理プログラムを記録した記憶媒体
 19. 特許第 003888549 号, 電子透かし検出システム
 20. 特許第 003963244 号, 情報多重化方法・情報抽出方法・これらの装置及びこれらの方法を実行するプログラムを格納した記憶媒体
 21. 特許第 003971814 号, 情報多重化方法および情報抽出方法
 22. 特許第 003985903 号, 画像圧縮方法およびそれを利用した電子透かし埋め込み方法, 並びにプログラム
 23. 特許第 003999159 号, コンテンツ関連情報提供システム, コンテンツ関連情報提供方法, 提供者装置, 利用者装置およびプログラム
- その他, 出願多数.

【外国】

1. US6185312, Method for embedding and reading watermark-information in digital form, and apparatus thereof (米国特許)
2. US6704431, Method and apparatus for digital watermarking (米国特許)
3. EP0855681, Method of embedding watermark-information into digital data (欧州特許)

4. US7072492, Method and apparatus for digital watermarking (米国特許)
5. TW260158, 電子透かし埋め込み装置, 電子透かし検出装置, 及びそれらの方法, 並びにプログラム (台湾特許)
6. TW265724, 電子透かし埋め込み装置, 電子透かし検出装置, 及びそれらの方法, 並びにプログラム (台湾特許)
7. US7164778, Digital watermark embedding method, digital watermark embedding apparatus, and storage medium storing a digital watermark embedding program (米国特許)
8. KR00714202, 電子透かし埋め込み装置, 電子透かし検出装置, 及びそれらの方法, 並びにプログラム (韓国特許)
9. KR00730611, 電子透かし埋め込み装置, 電子透かし検出装置, 及びそれらの方法, 並びにプログラム (韓国特許)

その他, 出願多数.

表彰等

1. NTT ヒューマンインタフェース研究所所長表彰, 平成 9 年.
2. NTT ソフトウェア研究所所長表彰, 平成 10 年.
3. NTT ヒューマンインタフェース研究所所長表彰, 平成 11 年.
4. NTT サイバーコミュニケーション総合研究所所長表彰, 平成 11 年.
5. NTT サイバーコミュニケーション総合研究所所長表彰, 平成 13 年.
6. 情報科学技術フォーラム FIT2003 ヤングリサーチャー賞, 2003 年. (学術講演・研究報告等の項番 7 について)
7. NTT サイバーコミュニケーション総合研究所所長表彰, 平成 15 年.
8. 情報科学技術フォーラム FIT2006 論文賞, 2006 年. (国際会議・査読付き講演・レター等の項番 7 について)
9. NTT サイバーコミュニケーション総合研究所所長表彰, 平成 18 年.

10. 映像情報メディア学会誌ベストオーサー, 2007 年. (解説記事等の項番 2 について)