

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

中村 高雄^{†1,*1} 山本 奏^{†2} 北原 亮^{†1}
片山 淳^{†1} 安野 貴之^{†3}
小池 秀樹^{†1} 曾根原 登^{†4}

カメラ付き携帯電話機で撮影したキャプチャ画像から電子透かしを検出し、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。従来の映像向けモバイル電子透かし技術では、携帯端末のビデオキャプチャフレームレート依存性の問題があった。本稿において、我々は SFPSS 法に基づく新たな映像向けモバイル電子透かし方式を提案する。提案方式では高速処理のために画素領域処理に改良された SFPSS 法を用いる。さらに検出結果の信頼性の定量的保証方法についても示す。提案方式を携帯電話機上に実装して行った評価実験により、端末性能依存性を解消し、携帯電話機上でリアルタイム検出処理が可能であり、さらに従来方式よりもロバストであることを確認できた。

SFPSS-based Video Watermarking Scheme for Real-time Detection on Camera Phones

TAKAO NAKAMURA,^{†1,*1} SUSUMU YAMAMOTO,^{†2}
RYO KITAHARA,^{†1} ATSUSHI KATAYAMA,^{†1}
TAKAYUKI YASUNO,^{†3} HIDEKI KOIKE^{†1}
and NOBORU SONEHARA^{†4}

Digital watermarking technology can be applied to mobile phone; the application system provides information related to pictures taken by camera phone. Conventional video watermarking technique for mobile phones has a problem of the dependency on video capture rate of each terminal. We propose a fast and robust video watermarking scheme based on the SFPSS method. In our scheme, the SFPSS method is improved to pixel-domain processing for high-speed processing. We also introduce a quantitative evaluation method to determine reliability of the detection results. Finally, we evaluate the scheme's

implementation on a mobile phone, and we confirm that the scheme can solve the dependency problem and also realize high robustness.

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^{1)–3)}。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1枚撮影して検出処理を行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ようになる(図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、再生映像をカメラで再撮影した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^{4)–7)}、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。

上記に鑑み、我々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

†1 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所
Nippon Telegraph and Telephone Corporation NTT Cyber Space Laboratories

†2 西日本電信電話株式会社
NTT West Corporation

†3 日本電信電話株式会社知的財産センタ
Nippon Telegraph and Telephone Corporation Intellectual Property Center

†4 国立情報学研究所
National Institute of Informatics

*1 現在、総合研究大学院大学複合科学研究科
Presently with The Graduate University for Advanced Studies

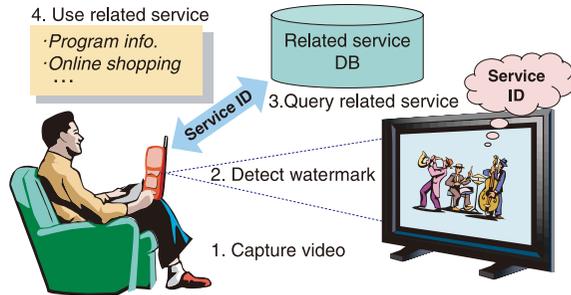


図 1 映像向けモバイル電子透かし
Fig. 1 Mobile watermarking for video.

かし方式を提案した⁸⁾。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、原画信号を抑制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いえない。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。このためあらかじ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。

本稿において、我々は単一周波数平面スペクトル拡散法 (Single Frequency Plane Spread Spectrum method, SFPSS 法⁹⁾) に基づく映像向けモバイル電子透かし方式を提案する。オリジナルの 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していたため処理量が多く携帯電話機上での処理が困難であった。提案方式では 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。

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 つをあげる：

- (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に成功すること
- (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ともな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) などともなうノイズ耐性のほか、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の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⁸⁾。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。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、たと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、まった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。

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⁸⁾の概要を説明する。

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 の極性と見なす)。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。

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

次に、 $z_m^{(n)}$ 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

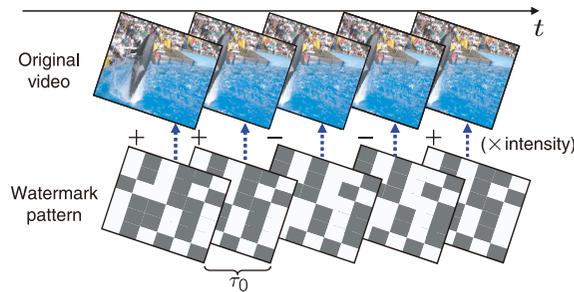


図 2 従来方式における電子透かし埋め込み
Fig. 2 Watermark embedding in the conventional scheme.

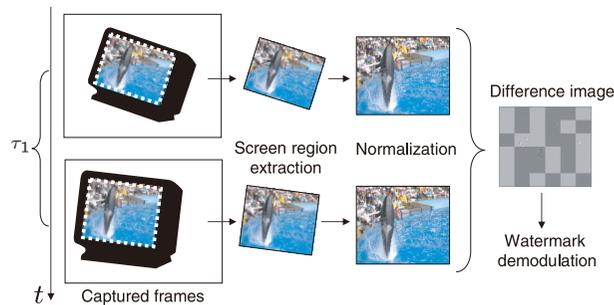


図 3 従来方式における電子透かし検出
Fig. 3 Watermark detection in the conventional scheme.

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，画質劣化とロバスト性のバランス調整を行う埋め込み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う．重畳の際には，透かしパターンの正負をあらかじめ定めた時間 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うようにする (図 2)．

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 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．以下のすべての処理が携帯電話機上でリアルタイムに実行される．

3.2.1 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¹⁰⁾ 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 3)．

3.2.2 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 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 $\vec{z}^{(n)}$ に対応する系列 $\vec{y}^{(n)}$ を得る．そして埋め込み時の擬似乱数列 $\vec{x}^{(n)}$ との内積

$$s_n = \vec{y}^{(n)} \cdot \vec{x}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \quad (2)$$

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/検出復号を行って電子透かし情報を復調する．

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

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いえない．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したりするおそれがある．

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ときには，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 3)．たとえば，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つね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

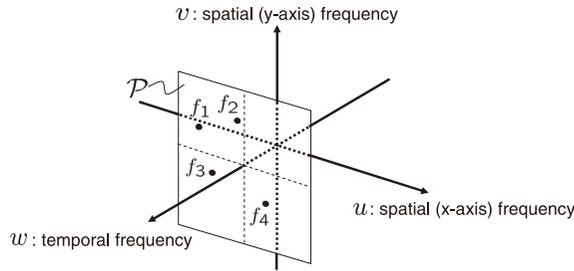


図 4 SFPSS 法による単一時間周波数平面への拡散系列埋め込み⁹⁾
 Fig. 4 Single frequency plane spread spectrum⁹⁾.

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。τ₁ 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、1 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。

4. SFPSS 法による映像電子透かし

次に SFPSS 法による映像電子透かし手法⁹⁾ の概要を説明する。SFPSS 法では、複素数の擬似乱数列 $\vec{\xi} = (\xi_1 \xi_2 \dots \xi_L) \in \mathbb{C}^L$ を、図 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。

$$\vec{g} = \vec{f} + \vec{\xi} \tag{3}$$

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。

$$\lambda = \vec{g}^j \cdot \vec{\xi} = (\vec{f} \cdot \vec{\xi} + |\vec{\xi}|^2) e^{j\Delta\theta} \tag{4}$$

\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、

$$\lambda \approx |\vec{\xi}|^2 e^{j\Delta\theta} \tag{5}$$

となる。したがって、 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¹¹⁾ 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。

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 (1 種類の乱数列で 1 つの透かし情報を表現) されているため、検出時にはとりうる透かし情報に対応するすべての複素乱数列との相関計算が必要である (たとえば 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。

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ごと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。

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 $\vec{\xi}^{(n)} = (\xi_1^{(n)} \xi_2^{(n)} \dots \xi_M^{(n)}) \in \mathbb{C}^M$ 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。

$$\vec{\zeta}^{(n)} = c_n \vec{\xi}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \tag{6}$$

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。

$$\vec{\nu}'^{(n)} = \vec{\nu}^{(n)} + a \vec{\zeta}^{(n)} \quad (n = 1 \dots N) \tag{7}$$

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

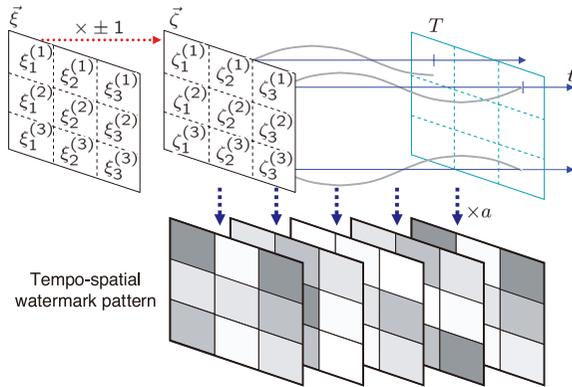


図 5 画素領域を用いた SFPSS 電子透かし埋め込み
Fig. 5 SFPSS watermark embedding using pixel domain.

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 5)。

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う。以下のすべ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。

5.2.1 空間同期

従来方式と同様、4.2.1 項で述べた高速な矩形追跡手法¹⁰⁾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。

5.2.2 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、すべての $\vec{\eta}^{(n)}$ 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。

$$\vec{\eta}^{(n)} = \vec{\eta}'^{(n)} e^{j\Delta\theta} \quad (n = 1 \dots N) \quad (8)$$

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たびに基底関数 $e^{-j\frac{2\pi t}{T}}$ と画素値との積和を逐次行うだけでよいから、DFT が不要であり高速処理が可能である。

5.2.3 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 (Hermitian 積) を求める。

$$\lambda_n = \vec{\eta}^{(n)} \cdot \vec{\xi}^{(n)} = \sum_{m=1}^M \eta_m^{(n)} \xi_m^{(n)*} \quad (n = 1 \dots N) \quad (9)$$

ここで $*$ は複素共役を表す。式 (6), (7), (8) を用いると

$$\lambda_n = (\vec{\eta}'^{(n)} \cdot \vec{\xi}^{(n)} + a c_n |\vec{\xi}^{(n)}|) e^{j\Delta\theta} \quad (10)$$

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

$$E[|\lambda_n|] = a |\vec{\xi}^{(n)}| \quad (11)$$

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 を乗積してすべての 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 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 c'_n を決定する (図 6)。 $\hat{\lambda}$ はすべての 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{c}' に対して誤り訂正/検出復号を行って透かし情報を復調する。

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実性問題に対して、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。

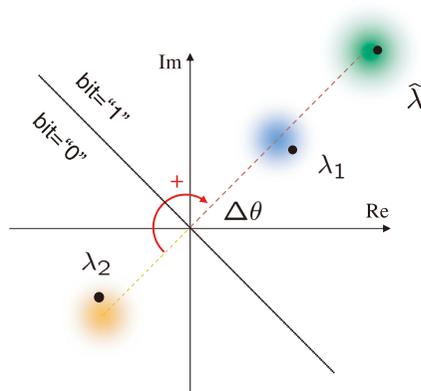


図 6 複素相関値からのビット値検出
Fig. 6 Bit value detection from complex correlation.

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⁹⁾。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、かつビットごと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章の評価実験において検証を行う。

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の検出に成功してしまう誤り)に分類できる^{2),8)}。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。

6.1 False positive

電子透かしが埋め込まれていないときの 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⁹⁾。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。

$$\kappa = \frac{\sum_{n=1}^N r_n - NE[r]}{\sqrt{NV[r]}} \quad (12)$$

電子透かしが埋め込まれていないときの 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とき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 が得られたときに、電子透かしな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 $P_e\left(\frac{1}{2}\right)$ をかけて以下ようになる。

$$P_f(\kappa) = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{\kappa}{\sqrt{2}}\right)P_e\left(\frac{1}{2}\right) \quad (13)$$

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見なせるから、 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 の関数 $P_e(p)$ である¹²⁾。これらを用いると指標値 κ が得られたときのmessage error rate P_m は以下のように表せる。

$$P_m(\kappa) = \int_0^\infty P_e(p)f_\kappa(p)dp \quad (14)$$

次節の実験条件のもとでの、指標値 κ に対する P_f と P_m を図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。

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

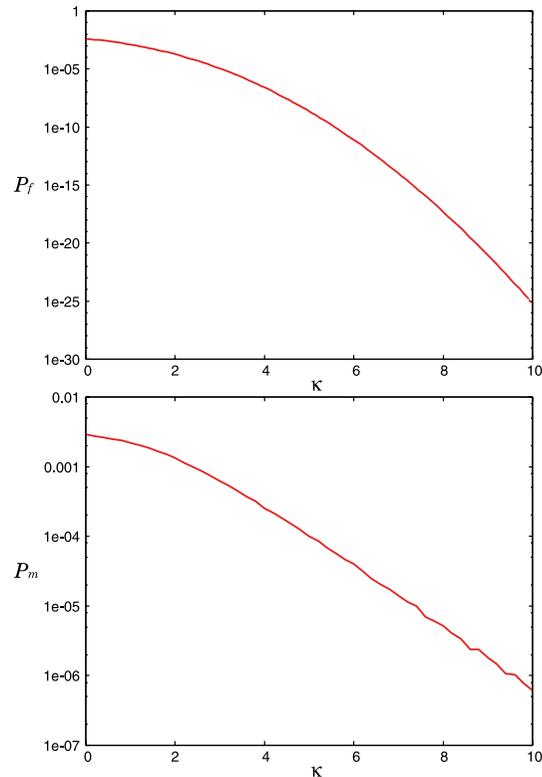


図 7 検出信頼度指標値 κ に対する false positive rate P_f (上) と Message error rate P_m (下)

Fig.7 False positive rate P_f (upper) and message error rate P_m (lower) for detection reliability index κ .

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¹³⁾，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

表 1 実装を行った携帯電話機のスペック

Table 1 Specifications of mobile phone used in the experiments.

Processor	32 bit RISC (ARM9) 220 MHz
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.



図 8 実験風景 (左) と実験プログラムの実行中画面 (右)

Fig.8 Experimental set up (left) and screenshot of test program (right).

行われる。

図 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したりすることができるようにした。

7.1 映像品質

映像情報メディア学会の標準映像 3 種¹⁴⁾ (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った。このときの 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

表 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)

Table 2 Detection results of the proposed scheme (14.98 FPS capturing).

MPEG-2 Compression	Video sequence	Success rate		
		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%

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¹⁵⁾。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。

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ほど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 章の議論に基づいて、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 (おおむ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の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

表 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)

Table 3 Detection results of the conventional scheme (14.98 FPS capturing).

MPEG-2 Compression	Video sequence	Success rate		
		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%

表 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)

Table 4 Detection results of the proposed scheme (4.99 FPS capturing).

MPEG-2 Compression	Video sequence	Success rate		
		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%

認できた。特に圧縮率が高いときに検出能力の差が顕著であった。

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の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。

表 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)

Table 5 Detection results of the conventional scheme (4.99 FPS capturing).

MPEG-2 Compression	Video sequence	Success rate		
		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%

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 1 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 1 度も生じなかった)。

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 フレームあたり平均 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 フレームあたり平均 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あわせて考えれば提案方式は十分に有効であるといえる。

8. おわりに

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。提案方式は高速化改良を行った SFPSS 法による時間シフト不変性とノイズ耐性により、高いロバスト性と高速処理を実現できる。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すべ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あげられる。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および耐性評価により、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。

謝辞 本研究を進めるにあたり、日頃よりご指導をいただいている NTT サイバースペース研究所の南部明所長、石橋聡プロジェクトマネージャをはじめとする皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 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 予稿集, N-020, pp.409-410 (2003) .
- 2) 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, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J87-D-II, No.12, pp.2145-2155 (2004).
- 3) 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).
- 4) Lubin, J., Bloom, J.A. and Cheng, H.: Robust, Content-Dependent, High-Fidelity Watermark for Tracking in Digital Cinema, *Proc. SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents V*, Vol.5020, pp.536-545 (2003).
- 5) Haitzma, J. and Kalker, T.: A Watermarking Scheme for Digital Cinema, *Proc. ICIP*, Vol.2, pp.487-489 (2001).
- 6) 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, 映像情報メディア学会誌, Vol.60, No.11, pp.1778-1788 (2006).
- 7) 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画像関連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 SCS12005 予稿集, 2C4-3, pp.865-870 (2005).
- 8) 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) .
- 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, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.7, pp.1755-1764 (2007).

- 10) 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).
- 11) Deguillaume, F., Csurka, G., O'Ruanaidh, J. and Pun, T.: Robust 3D DFT Video Watermarking, *Proc. SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents I*, Vol.3657, pp.113-124 (1999).
- 12) MacWilliams, F.J. and Sloane, N.J.A.: *The Theory of Error Correcting Codes*, North-Holland Publishing (1977).
- 13) 樋渡涓二 (編): 画像工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.10-59 (1986).
- 14) テレビジョン・システム評価用テストチャート, 映像情報メディア学会 (オンライン) 入手先 http://www.ite.or.jp/products/testchart_index.html (参照 2007-08-20).
- 15) 坂田晴夫: 視覚の色度の時間周波数特性—色差弁別しきい, 電子通信学会 A, Vol.J63-A, No.12, pp.855-861 (1980).

(平成 19 年 8 月 27 日受付)
(平成 19 年 12 月 4 日採録)



中村 高雄 (正会員)

平成 6 年早稲田大学教育学部理学科 (数学) 卒業。同年日本電信電話 (株) 入社。以来, コンテンツ流通技術, 特に電子透かし技術に関する研究開発に従事。現在, 総合研究大学院大学博士後期課程 (情報学) 在学中。平成 15 年 FIT2003 ヤングリサーチアワード受賞。



山本 奏 (正会員)

平成 11 年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了 (計算機科学)。同年日本電信電話 (株) 入社。以来, コンテンツ流通, メタデータ管理, 電子透かし技術の研究開発に従事。現在, 西日本電信電話 (株) 勤務。平成 18 年 FIT2006 論文賞受賞。



北原 亮

平成 15 年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。以来, コンテンツ流通, 電子透かし技術の研究開発に従事。現在, NTT サイバースペース研究所勤務。



片山 淳

昭和 61 年九州大学大学院修士課程修了 (機械専攻)。同年日本電信電話 (株) 入社。以来, UNIX WS, LISP WS, ビジネスホン電話機, TV 電話機, ロボット用レーザレンジセンサの開発に従事。現在, NTT サイバースペース研究所勤務。機械学会・ロボット学会・電子情報通信学会各会員。



安野 貴之 (正会員)

昭和 63 年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。以来, コンピュータビジョン, マルチメディア DB システム, パーチャルリアリティ, ビジュアル通信システムの研究開発に従事。平成 6~9 年早稲田大学大学院訪問研究員。平成 12~15 年早稲田大学客員助教授 (非常勤) 兼務。現在, NTT 知的財産センタ担当部長。平成 14 年画像電子学会画像電子技術賞受賞。画像電子学会会員, 理事等。博士 (工学)。



小池 秀樹

昭和 60 年東北大学大学院理学研究科博士前期課程修了 (理修)。同年日本電信電話 (株) 入社。NTT 横須賀電気通信研究所に入所し, 画像処理, 画像認識関係の研究に従事。平成 13 年 NTT コムウェアに転籍し, RFID の研究開発に従事。平成 19 年 NTT サイバースペース研究所画像メディア通信プロジェクト映像メディア処理技術グループリーダー, 主幹研究員, 電子情報通信学会会員。



曾根原 登

昭和 53 年信州大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社（現 NTT）入社。以来、ファクシミリ、画像処理、神経回路網システム、コンテンツ ID、コンテンツ流通システム等の研究開発に従事。昭和 63 年～平成 4 年国際電気通信基礎研究所（ATR）視聴覚機構研究所に出向。平成 12 年 NTT サイバーソリューション研究所コンテンツ流通プロジェクトマネージャ。東京工業大学客員教授。平成 16 年より NII 国立情報学研究所教授。電子情報通信学会会員，代議員等。映像情報メディア学会会員，評議委員等。画像電子学会会員，理事等。工学博士。
