

Gyrator 変換と Dyadic Wavelet 変換に基づく デジタル画像電子透かし

佐賀大学工学部 皆本 晃弥

Teruya Minamoto

Faculty of Science and Engineering

Saga University

1 はじめに

Gyrator 変換は、文献 [8] において、Corss Gyrator として登場し、文献 [7] でその性質が調べられた。近年、Gyrator 変換は、情報セキュリティ分野で使われており、それに基づく電子透かし法も提案されている [2]。一方、著者らは、これまで Dyadic Wavelet 変換に基づく電子透かし法を開発してきた [5]。本稿では、Gyrator 変換およびその計算法について述べるとともに、筆者らの方法と Gyrator 変換を組み合わせた電子透かし法を提案し、その数値実験結果について述べる。

2 分数次フーリエ Transform

Gyrator 変換は、分数次フーリエ変換 (Fractional Fourier Transform) の一般化と考えられるため、まずは分数次フーリエ変換について確認しておく。

分数次フーリエ変換は、フーリエ変換を一般化したものであり、次式で定義される [1]。

$$\mathcal{F}_\alpha[f](u) = \sqrt{1 - i \cot(\alpha)} e^{i\pi \cot(\alpha) u^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ -2\pi i \left(\csc(\alpha) u x - \frac{\cot(\alpha)}{2} x^2 \right) \right\} f(x) dx \quad (1)$$

$\alpha = 0$ のときは、 $\mathcal{F}_0[f](u) = f(u)$ と解釈する。また、 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ のときは、 $\csc \frac{\pi}{2} = 1$ 、 $\cot \frac{\pi}{2} = 0$ なので、

$$\mathcal{F}_{\frac{\pi}{2}}[f](u) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi i u x) f(x) dx \quad (2)$$

となり、フーリエ変換と一致する。また、加法性 $\mathcal{F}_{\alpha+\beta} = \mathcal{F}_\alpha \mathcal{F}_\beta$ が成立するので、 $(\mathcal{F}_\alpha)^{-1} = \mathcal{F}_{-\alpha}$ が成り立つ。

フーリエ変換は、時間領域信号を周波数領域信号へ変換するものだが、分数次フーリエ変換は信号を時間と周波数の間の領域へと変換するもの、別の言い方をすれば、時間周波数領域 (x, u) における回転と解釈できる。

また、2次元分数次フーリエ変換は次式で定義される。

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{\alpha, \gamma}[f](u, v) &= \sqrt{1 - i \cot(\alpha)} \sqrt{1 - i \cot(\gamma)} e^{i\pi(u^2 \cot(\alpha) + v^2 \cot(\gamma))} \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-2\pi i(ux \csc(\alpha) + vy \csc(\gamma))\} \exp\left\{2\pi i\left(\frac{\cot(\alpha)}{2}x^2 + \frac{\cot(\gamma)}{2}y^2\right)\right\} dx dy \end{aligned} \quad (3)$$

3 Gyrator 変換

2次元分数次フーリエ変換は、空間-空間周波数平面 (x, u) 平面と (y, v) における回転を生成するが、2次元 Gyrator 変換は、「ねじれた」空間-空間周波数平面 (x, v) 平面と (y, u) 平面における回転を生成する。ここで、 (x, u) , (y, v) ではなく、 (x, v) , (y, u) となっていることに注意されたい。この状況を「ねじれた」と表現している。

2次元 Gyrator 変換は次式で定義される。

$$\begin{aligned} G(u, v) &= \mathcal{G}_\alpha[f](u, v) \\ &= \frac{1}{|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp\left\{2\pi i \frac{(uv + xy) \cos \alpha - (xv + uy)}{\sin \alpha}\right\} dx dy \end{aligned} \quad (4)$$

この式を見ると、2次元 Gyrator 変換は2次元分数次フーリエ変換に似ていることが分かる。

$\alpha = 2k\pi$ のときは、 $\mathcal{G}_0 = \mathcal{I}$ 、つまり、 $G(u, v) = f(u, v)$ と定義する。ただし、 $\mathcal{I}$ は恒等写像である。また、 $\alpha = (2k+1)\pi$ のときは、 $G(u, v) = f(-u, -v)$ と定義する。

$\alpha = \frac{\pi}{2}$ のとき、 (u, v) の軸を入れ換えて $(U, V) = (v, u)$ とすれば、

$$\begin{aligned} G(u, v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp\{-2\pi i(xv + uy)\} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp\{-2\pi i(xU + Vy)\} dx dy = \hat{f}(U, V) = \hat{f}(v, u) \end{aligned} \quad (5)$$

となるので、Gyrator 変換は、 u と v を入れ替えたフーリエ変換と一致する。

また、Gyrator 変換は加法性と周期性

$$\mathcal{G}_\alpha \mathcal{G}_\beta = \mathcal{G}_{\alpha+\beta}, \quad \mathcal{G}_{\alpha+2\pi} = \mathcal{G}_\alpha \quad (6)$$

が成立するので、逆 Gyrator 変換は、 $\mathcal{G}_{-\alpha}$ である。つまり、 $(\mathcal{G}_{\alpha})^{-1} = \mathcal{G}_{-\alpha}$ が成立する。なお、詳細は省略するが、フーリエ変換で成立するような性質、例えば、パーセバルの等式も成立する。

4 高速離散 Gyrator 変換

ここでは、文献 [3] に基づいて、Gyrator 変換をコンピュータで計算する方法について述べる。

Gyrator 変換の核 (Kernel) を

$$K(x, y; u, v) = \frac{1}{|\sin \alpha|} \exp \left\{ 2\pi i \frac{(uv + xy) \cos \alpha - (xv + uy)}{\sin \alpha} \right\} \quad (7)$$

と表せば、

$$\cot \alpha = -\tan \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{\sin \alpha} \quad (8)$$

より、(7) は次のように表せる。

$$K(x, y; u, v) = \frac{\exp \left\{ -2\pi i (xy + uv) \tan \frac{\alpha}{2} \right\}}{|\sin \alpha|} \exp \left\{ 2\pi i \frac{(x - u)(y - v)}{\sin \alpha} \right\} \quad (9)$$

ここで、2次元の畳み込み

$$(f \otimes g)(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) g(u - x, v - y) dx dy \quad (10)$$

および、今、

$$\begin{aligned} p(s, t) &= \exp \left(-2\pi i s t \tan \frac{\alpha}{2} \right) \\ q(s, t) &= \frac{\exp (2\pi i s t \csc \alpha)}{|\sin \alpha|} \end{aligned} \quad (11)$$

とおけば、

$$\begin{aligned} &\{[f(x, y)p(x, y)] \otimes q(x, y)\} (u, v) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \left(-2\pi i xy \tan \frac{\alpha}{2} \right) \frac{\exp \{2\pi i (u - x)(v - y) \csc \alpha\}}{|\sin \alpha|} dx dy \end{aligned} \quad (12)$$

なので、

$$\begin{aligned} &p(u, v) \{[f(x, y)p(x, y)] \otimes q(x, y)\} (u, v) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-2\pi i uv \tan \frac{\alpha}{2} \right) f(x, y) \exp \left(-2\pi i xy \tan \frac{\alpha}{2} \right) \frac{\exp \{2\pi i (u - x)(v - y) \csc \alpha\}}{|\sin \alpha|} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) K(x, y; u, v) dx dy = G(u, v) \end{aligned} \quad (13)$$

が成り立つ。(13)を

$$G(u, v) = p(u, v)[(pf) \otimes q](u, v) \quad (14)$$

と表せば、フーリエ変換の性質

$$\widehat{f \otimes g}(u, v) = \hat{f}(u, v)\hat{g}(u, v), \quad \widehat{(fg)}(u, v) = \hat{f} \otimes \hat{g}(u, v) \quad (15)$$

より, (14) は次のように書ける.

$$\mathcal{F}[G] = \mathcal{F}[p] \otimes \mathcal{F}[pf \otimes q] = \mathcal{F}[p] \otimes (\mathcal{F}[pf]\mathcal{F}[q]) \quad (16)$$

ゆえに,

$$G = \mathcal{F}^{-1}\mathcal{F}[p]\mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}[pf]\mathcal{F}[q]) = p\mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}[pf]\mathcal{F}[q]) \quad (17)$$

と表せる. これは, G が高速フーリエ変換で求められることを意味する.

特に, $q(x, y)$ のフーリエ変換 $\hat{q}(u, v)$ は解析的に求められる. 実際, デルタ関数 $\delta(x)$ の性質より,

$$\begin{aligned} \hat{q}(u, v) &= \mathcal{F}[q](u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(2\pi i xy \csc \alpha)}{|\sin \alpha|} \exp\{-2\pi i(xu + yv)\} dx dy \\ &= \frac{1}{|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i y v} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i x(y \csc \alpha - u)} dx \right) dy \\ &= \frac{1}{|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i y v} \delta(y \csc \alpha - u) dy \\ &= \frac{1}{|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i \frac{z+u}{\csc \alpha} v} \delta(z) \frac{1}{\csc \alpha} dz = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i(z+u)v \sin \alpha} \delta(z) dz \\ &= e^{-2\pi i u v \sin \alpha} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i z v \sin \alpha} \delta(z) dz = e^{-2\pi i u v \sin \alpha} \left(e^{-2\pi i z v \sin \alpha} \Big|_{z=0} \right) \\ &= e^{-2\pi i u v \sin \alpha} e^0 = \exp(-2\pi i u v \sin \alpha) \end{aligned} \quad (18)$$

が成り立つ. これと (17) より,

$$G = p\mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[pf]\hat{q}] \quad (19)$$

x 方向が M 点, y 方向が N 点あったとすれば, 標本点は次式で定義される.

$$\begin{cases} x(k) &= u(k) = \frac{k-(N-1)/2}{\sqrt{M}} \\ y(j) &= v(j) = \frac{j-(M-1)/2}{\sqrt{N}} \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, M-1, j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (20)$$

したがって, G は, (19) と (20) で計算される.

以下に, Lenna 画像を Gyrator 変換した結果を示す.

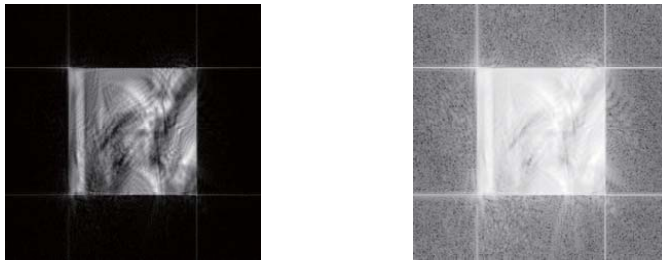


図 1: $\alpha = \frac{\pi}{3}$ のときの Gyrator 変換結果 図 2: 左図の黒色部分を見やすいように log をとって可視化したもの

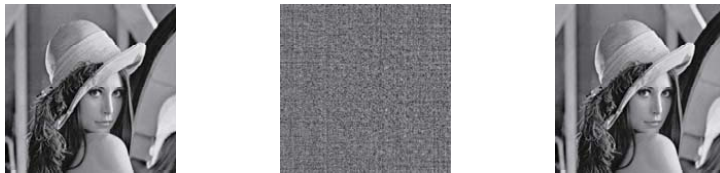


図 3: 逆変換後の実部 図 4: 逆変換後の虚部 図 5: 逆変換後の絶対値

5 Dyadic Wavelet 変換

2次元 Dyadic Wavelet 変換 (DYWT)[4, 6] は、次式で与えられる。DYWT はシフト不変性を有し、画像処理や信号処理などで広く利用されている。

$$\begin{aligned}
 C^{m+1}[i, j] &= \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[l]h[k]C^m[i + 2^m l, j + 2^m k] \\
 D^{m+1}[i, j] &= \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[l]g[k]C^m[i + 2^m l, j + 2^m k] \\
 E^{m+1}[i, j] &= \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g[l]h[k]C^m[i + 2^m l, j + 2^m k] \\
 F^{m+1}[i, j] &= \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g[l]g[k]C^m[i + 2^m l, j + 2^m k]
 \end{aligned}$$

ここで、 $m \geq 0$ に対して、 $C^0[i, j]$ は原画像、 i は垂直方向の要素の位置、 j は水平方向の要素の位置である。原画像 C^0 に DYWT を施すと、低周波成分 $C[i, j]$ 、垂

直方向の高周波成分 $D[i, j]$, 水平方向の高周波成分 $E[i, j]$, 斜め方向の高周波成分 $F[i, j]$ が得られる.

また, 2次元逆DYWTは次式で与えられる.

$$C^m[i, j] = \frac{1}{4} \sum_l \sum_k \left(\tilde{h}[l] \tilde{h}[k] C^{m+1}[i - 2^m l, j - 2^m k] + \tilde{h}[l] \tilde{g}[k] D^{m+1}[i - 2^m l, j - 2^m k] \right. \\ \left. + \tilde{g}[l] \tilde{h}[k] E^{m+1}[i - 2^m l, j - 2^m k] + \tilde{g}[l] \tilde{g}[k] F^{m+1}[i - 2^m l, j - 2^m k] \right)$$

本稿の実験では, 文献 [4] に記載されている2次スプラインウェーブレットとスケール関数から計算されたフィルタ係数を用いた (表 1).

表 1: 2次スプラインウェーブレットとスケール関数から計算されたフィルタ係数

n	$h[n]/\sqrt{2}$	$\tilde{h}[n]/\sqrt{2}$	$g[n]/\sqrt{2}$	$\tilde{g}[n]/\sqrt{2}$
-2				-0.03125
-1	0.125	0.125		-0.21875
0	0.375	0.375	-0.5	-0.6875
1	0.375	0.375	-0.5	0.6875
2	0.125	0.125		0.21875
3				-0.03125

図 6 に, Lenna 画像に DYWT を施した例を示す.

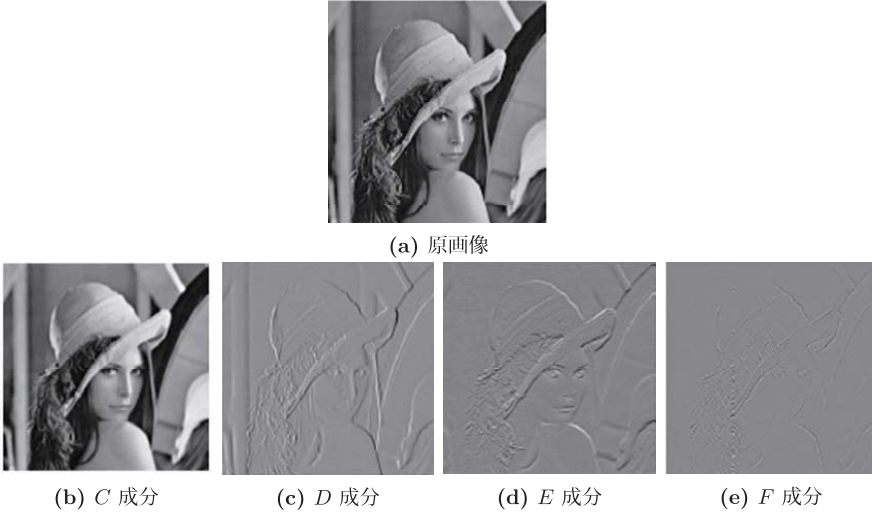


図 6: 原画像と DYWT から得た周波数成分 C, D, E, F

6 電子透かし法のアルゴリズム

我々の電子透かし法アルゴリズムについて述べる。ここで提案する方法は、透かしの抽出の際に原画像を必要としない非参照 (Blind) 型に分類されるものである。まず、埋め込みアルゴリズムを示す。

- (1) 原画像に Gyrator 変換を行い、得られた画像に対して、DYWT を適用することによって、4 種類の周波数成分 $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$ に分解する。
- (2) 透かしの埋め込み周波数成分として、Step1 で得た 4 種類の周波数成分の中からいくつかを選択する。
- (3) 透かしの埋め込まない周波数成分については、原画像を通常の DYWT で、4 種類の周波数成分に分解して得た周波数成分に置き換える。
- (4) 透かしの埋め込む周波数成分に応じて、透かしの埋め込み強度を決定する。透かしの埋め込み強度 α は、以下の式を利用して、計算する。

$$\alpha = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (\sup(S_i[m, n]) - \inf(S_i[m, n]))$$

ここでは、 MN は周波数成分 S_i のピクセル数であり、 $S_i[m, n]$ は位置 $[m, n]$ におけるピクセル値である。

- (5) 透かしの埋め込む周波数成分に、以下のような処理を施す。

$$\underline{S}_i[m, n] = \text{sgn}(S_i[m, n]) \cdot \frac{1}{2K+1} \frac{1}{2L+1} \sum_{\mu=-K}^K \sum_{\nu=-L}^L |S_i[m+\mu, n+\nu]|$$

ここで、定数 K と L は自然数である。

- (6) 以下の式を利用して、透かしの埋め込む周波数成分 $\underline{S}_i$ に、 -1 と 0 と 1 からなる 3 値の電子透かし画像 W を埋め込む。

$$\tilde{S}_i[m, n] = \underline{S}_i[m, n] + \alpha W[m, n]$$

- (7) Step3,6 から得られる周波数成分を使い、逆 Gyrator 変換と逆 DYWT を順に施すことによって、透かし入り画像 $\tilde{C}^0$ を生成する。

図 7 は、非参照型電子透かし法における埋め込み手順を、図 8 は、埋め込みアルゴリズムの実行イメージを示している。

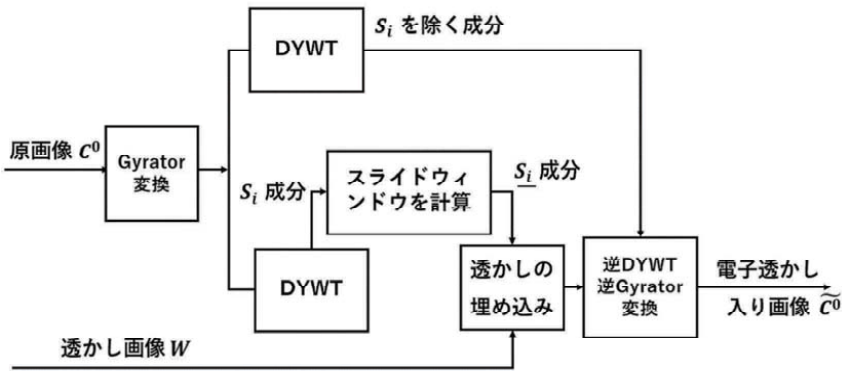


図 7: 埋め込み手順

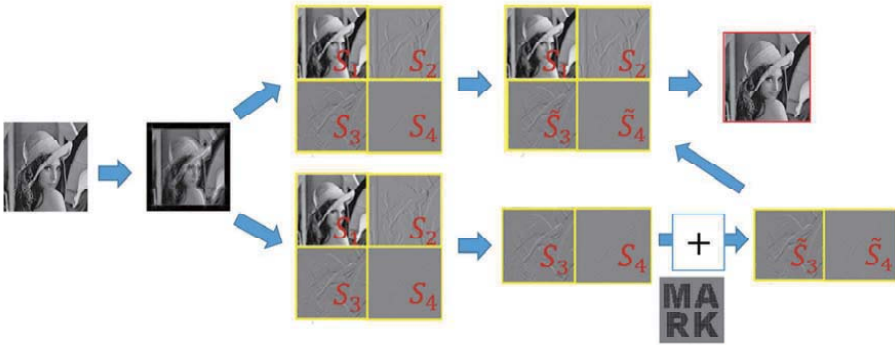


図 8: 埋め込みイメージ

次に、透かし抽出アルゴリズムを示す。

- (1) 透かし入り画像 $\tilde{C}^0$ に、Gyrator 変換と DYWT を順に施し、透かし情報を含む 4 種類の周波数成分に分解する。ここで、透かしの埋め込み時に選択し、透かしの埋め込みを行った周波数成分を、透かし入り周波数成分 $\tilde{S}_i$ として選択する。
- (2) 透かし入り周波数成分 $\tilde{S}_i$ に、埋め込みアルゴリズム Step5 の式であるサイズ $(2K + 1) \times (2L + 1)$ からなるスライドタイプのスライドウィンドウを適用することで、平滑化透かし入り周波数成分 $\tilde{\tilde{S}}_i$ を計算する。

- (3) 透かし入り周波数成分 $\tilde{S}_i$ と平滑化透かし入り周波数成分 $\underline{\tilde{S}}_i$ を利用して、以下の計算をすることで透かしを抽出する。

$$\begin{aligned}\widetilde{W}_i &= \text{sgn}(|\tilde{S}_i| - |\underline{\tilde{S}}_i|), \\ \widetilde{W}_e &= \widetilde{W}_3 + \widetilde{W}_4, \\ \widetilde{W} &= \text{sgn}(\widetilde{W}_e)\end{aligned}$$

ここで、 $\text{sgn}(x)$ は、

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0, \\ 0 & x = 0, \\ -1 & x < 0. \end{cases}$$

で定義される符号関数を表す。

抽出手順では、抽出透かし画像 $\widetilde{W}$ を抽出するために、複数の透かし入り周波数成分 $\widetilde{W}_i$ を足し合わせる。これにより、複数の周波数成分において、電子透かしに関する情報を共有することができ、電子透かしアルゴリズムのロバスト性が向上することが期待できる。図9は、非参照型電子透かし法における抽出手順を示し、図10は、非参照型電子透かし法における抽出アルゴリズムの実行イメージを示している。

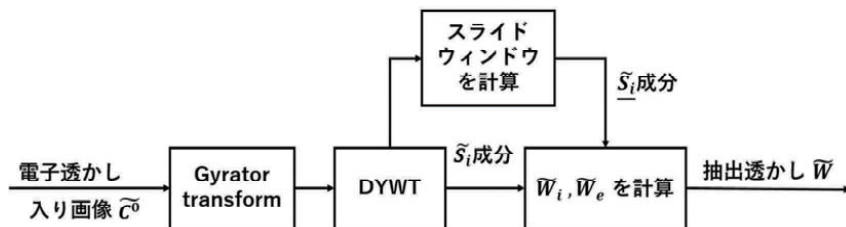


図 9: 抽出手順

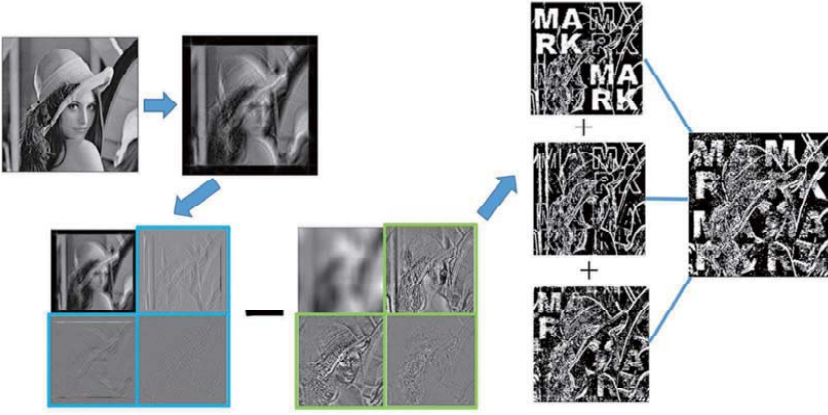


図 10: 抽出手順イメージ

7 画質評価方法

本稿では、透かし入り画像の画質評価の指標として、PSNR と SSIM を使用するため、これらについて述べる。

7.1 PSNR

PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)PSNR とは、平均二乗誤差 (MSE) によって求められ、MSE を以下のように計算する。

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (H(m, n) - \tilde{H}(m, n))^2 \quad (21)$$

8 ビットのグレースケール画像に対する PSNR は、以下のように計算される。

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (22)$$

ここで、 H は、 $M \times N$ ピクセルの原画像であり、 $\tilde{H}$ は、評価画像である。また、 m と n は、画像の水平方向と垂直方向の位置である。単位は dB によって表される。PSNR の値が高いほど、画質が良いとされる。また、原画像と評価画像が同じ場合は、 $MSE = 0$ であるため、 $PSNR = \infty$ である。

7.2 SSIM

SSIM (Structural Similarity) とは、原画像と評価画像の間の輝度、コントラスト、構造を計算することによって、類似度を評価しており、PSNR よりも主観評価に近いものとして開発された画質劣化評価法である [10]。SSIM の値の範囲は、0 から 1 までであり、SSIM の値が 1 に近ければ、画質が良く、SSIM の値が 0 に近ければ、画質が悪いとなる。また、原画像と評価画像が同じ場合、SSIM の値が 1 となる。

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ と $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ は、それぞれ原画像と評価画像であり、 $N = M_1 \times M_2$ とする。まず、輝度は以下のように定義される。

$$l(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (23)$$

ここで、 μ_x と μ_y は、それぞれ $\mathbf{x}$ と $\mathbf{y}$ の平均値であり、定数 C_1 は、 $\mu_x^2 + \mu_y^2$ が 0 に非常に近い場合に対して、計算の不安定な状況を回避するために含まれている。例えば、 $\mu_x^2 + \mu_y^2 = 0$ とすると、定数 C_1 を含まなければ、 $l(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ は ∞ となり、計算が安定しない。 L はピクセル値のダイナミックレンジ (8 ビットのグレースケール画像の場合は 255) であり、 $K_1 \ll 1$ は定数であり、 $C_1 = (K_1 L)^2$ と $K_1 = 0.01$ はデフォルト設定である。

次に、コントラストは以下のように定義される。

$$c(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (24)$$

ここで、 $\sigma_x^2 = (\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2) / (N - 1)$ 、 $\sigma_y^2 = (\sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2) / (N - 1)$ であり、 $C_2 = (K_2 L)^2$ 、 $K_2 \ll 1$ であり、 $K_2 = 0.03$ はデフォルト設定である。

構造は以下のように定義される。

$$s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (25)$$

ここで、 $\sigma_{xy} = (\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)) / (N - 1)$ 、 C_3 は定数である。

このとき、原画像 $\mathbf{x}$ と評価画像 $\mathbf{y}$ の SSIM は、以下のように定義される。

$$SSIM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [l(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^\alpha \cdot [c(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^\beta \cdot [s(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^\gamma \quad (26)$$

ここで、 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 、 $\gamma > 0$ は、輝度、コントラスト、構造の 3 つの要素の相対的重要性を調整するために使われるパラメータである。 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ と $C_3 = C_2/2$ と設定することで、SSIM の具体的な式は、以下のように与えられる。

$$SSIM(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_x\sigma_y + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (27)$$

原画像にDYWTを適用した後、逆DYWTによって再構成したときのPSNRとSSIMの値を図11に示す。



図 11: 原画像と再構成画像の各値 (PSNR=64.12, SSIM=0.99)

8 数値実験

実験画像として、標準画像データベースSIDBAのLenna, Girl, Woman, Elaineを利用した[11]. これらの画像は256×256ピクセル, 8bitグレイスケール画像である. また、電子透かし画像として、画像サイズが128×128ピクセルで、-1, 0, 1の値をもつ3値画像を利用した図12は原画像を、図13は透かし画像を示す.



図 12: 原画像

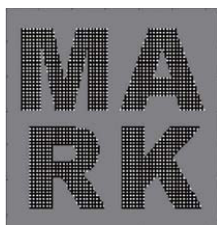


図 13: 電子透かし画像:128 × 128 ピクセル

本実験では、スライディングウィンドウ幅 $K = L = 20$, 埋め込み強度 $\alpha = 1.0$, 回転角 $\pi/1000$ に設定し実験を行った. 以下に, Gyrator 変換と DYWT を用いた非参照型電子透かし法についての実験結果を示す.

●攻撃なし



図 14: 電子透かし入り画像（上段）とそれから抽出した透かし画像（下段）

図 14 は, 画像編集なしの電子透かしを埋め込まれた画像に対して, 透かしを抽出した実験結果である. 図 14 に記載された PSNR と SSIM の各値は, 原画像と透かし入り画像間で画質の劣化を表わしている. 透かし入り画像から抽出された透かし画像から, 一目で透かし画像『MARK』という文字の存在を確認することができる.

●ごましおノイズ



図 15: ごましおノイズ（ノイズ密度：0.01）を付加した透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像

図 15 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、ノイズ密度が 0.01 であるごましおノイズを付加した画像から、透かしを抽出した実験結果である。図 15 の結果から、第二象限と第四象限の透かしが識別しにくいですが、透かし画像の『MARK』という文字の存在を確認することができる。

●メディアンフィルタリング



図 16: メディアンフィルタリング（マスク長が 3×3 ）を適用した透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像

図 16 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、マスク長が 3×3 のメディアンフィルタリングを適用した画像から、透かしを抽出した実験結果である。図 16 の結果から、全体的に透かしの識別が難しいが、透かし画像の『MARK』という文字の存在を確認することができる。

●白色ガウシアンノイズ



図 17: 白色ガウシアンノイズ（平均：0，分散：0.001）を付加した透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像

図 17 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、平均：0，分散：0.001 の白色ガウシアンノイズを付加した画像から、透かしを抽出した実験結果である。図 17 の結果から、全体的に透かしの識別が難しいが、透かし画像の『MARK』という文字の存在を確認することができる。

●切り取り



図 18: 190 × 190 ピクセルに切り取った透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像

図 18 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、190 × 190 ピクセルに切り取った透かし入り画像から、透かしを抽出した実験結果である。図 18 の結果から、全体的に透かしの識別が難しいが、透かし画像の『MARK』という文字の存在を確認することができる。

●回転



図 19: 回転操作 (回転角:5°) した透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像

図 19 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、(回転角:5°)で回転操作した透かし入り画像から、透かしを抽出した実験結果である。ここでは、文献 [12] の

IHC(Information Hiding and its Criteria for evaluation) が定めた回転操作の回転パラメータに則り, 回転角を 5° に設定した. 図 19 の結果から, 全体的に透かしの識別が難しいが, 透かし画像の『MARK』という文字の一部存在を確認することができる.

●拡大縮小



図 20: 拡大 (1.2 倍) した透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像



図 21: 縮小 (0.8 倍) した透かし入り画像とそれから抽出した透かし画像

図 20, 図 21 は, 電子透かしを埋め込まれた画像に対して, それぞれ 1.2 倍, 0.8 倍に拡大縮小した透かし入り画像から, 透かしの抽出した実験結果である. 図 20, 図 21 の結果から, 全体的に透かしの識別が難しいが, 透かし画像の『MARK』と

いう文字の一部存在を確認することができる。

● JPEG 圧縮

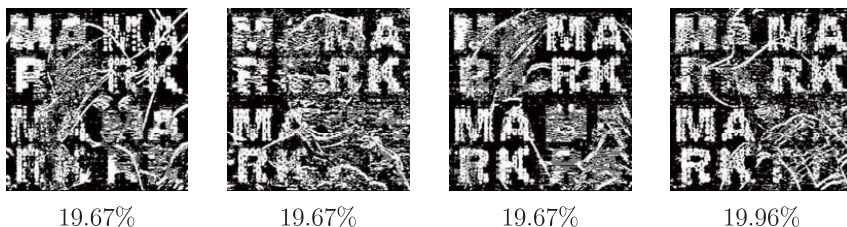


図 22: JPEG 圧縮した透かし入り画像から抽出した透かし画像（左から Lenna, Girl, Woman, Elaine 画像）

図 22 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、JPEG 圧縮された画像から、透かしを抽出した実験結果である。図 22 の下に記載された数値は圧縮率を示している。ここで、圧縮率とは、圧縮前のデータサイズと圧縮後のデータサイズの比率を意味する。図 22 の結果から、透かしの識別が難しいが、透かし画像の『MARK』という文字の存在を確認することができる。

● 複数攻撃

透かし入り画像を公開する過程で、複合的な画像編集をするケースは少なく無い。例えば、データ量を削減して、デジタル画像の一部分だけを使用したい場合には、デジタルが画像に対して、データ量を削減するために JPEG 圧縮を行い、続いて、必要な部分だけを切り取る操作をすること等が考えられる。つまり、電子透かし法は、複数攻撃にも耐性を備える必要がある。

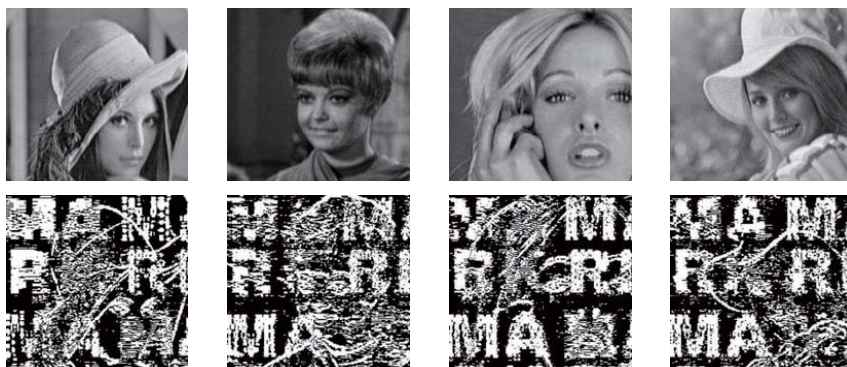


図 23: 複数攻撃 (JPEG 圧縮と切り取り) した透かし入り画像と抽出した透かし

図 23 は、電子透かしを埋め込まれた画像に対して、JPEG 圧縮し、切り取りした画像から、透かしを抽出した実験結果である。JPEG 圧縮の圧縮率は 19.67% で、 190×190 ピクセルに切り取ったものである。図 23 の結果から、複数攻撃が加えられたことにより、透かし画像の『MARK』という文字の存在を確認することができ、本手法は、複数攻撃にも耐性があるといえる。

9 既存手法との比較実験

既存の電子透かし法と比較する。今回は、比較対象として文献 [5], [9] の方法を選択し、本手法と同じ原画像、透かし画像、パラメータで再現して比較した。文献 [5] は、DYWT と区間演算を用いた非参照型電子透かし法であり、文献 [9] は、離散 Wavelet 変換 (DWT) と特異値分解 (SVD) を用いた電子透かし法である。ただし、文献 [9] は、抽出の際に透かし画像を必要とする参照型電子透かし法である。

Lenna 画像における、提案手法と既存の手法を比較結果を表 2 はにまとめた。表 2 から、本手法は十分にロバスト性を持つことがわかる。

攻撃/手法	提案手法	手法 [5]	手法 [9]
透かし入り画像			
PSNR 値	33.7570	32.5257	43.9514
攻撃なしから抽出した透かし			
ごましおノイズから抽出した透かし			
メディアンフィルタリングから抽出した透かし			
白色ガウシアンノイズから抽出した透かし			
切り取りから抽出した透かし			

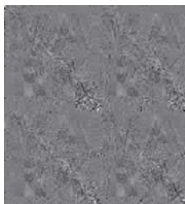
攻撃/手法	提案手法	手法 [5]	手法 [9]
回転から抽出した透かし			
拡大から抽出した透かし			
縮小から抽出した透かし			
JPEG 圧縮から抽出した透かし			
複数攻撃から抽出した透かし			

表 2: 既存の手法との比較

比較実験結果が示すように、提案手法は、既存の手法 [5] に比べ、PSNR 値が向上しており、JPEG 圧縮した画像から抽出した透かしにおいて、目視では、よりはっきりと『MARK』という文字が識別できる。一方、既存の手法 [9] との比較では、画質劣化の指標である PSNR 値において、既存の手法の方が提案手法より

も高いが，幾何学的操作に対しては，提案手法の方が手法 [9] よりも耐性を有する．

10 おわりに

本論文では，Gyrator 変換と DYWT を組み合わせた電子透かし手法を提案した．実験結果から，切り取りや JPEG 圧縮，幾何的操作などの様々な攻撃に対する耐性確認することができた．また，従来の電子透かし法の埋め込み・検出キーは，埋め込み強度 α と埋め込み周波数成分の 2 つであったが，提案手法ではこれらに Gyrator 変換の回転角パラメーターが加わったため，秘匿性が向上したといえる．

ただし，現時点の方法は，既存の我々の方法に Gyrator 変換を単純に組み合わせたに過ぎず，Gyrator 変換の性質を十分に生かしているとは言い難い．今後は，Wavelet と Gyrator 変換を融合させた Gyrator Wavelet 変換の数学的な性質を明らかにした上で，画像処理に活用したい．

謝辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 19K03623 の助成を受けたものである．また，本稿で示した実験では，井手新氏 (佐賀大学大学院理工学研究科理工学専攻データサイエンスコース 2021 年 3 月修了) にご協力頂いた．

参考文献

- [1] Haldun M. Ozaktas, Zeev Zalevsky, M. Alper Kutay: The Fractional Fourier Transform: with Applications in Optics and Signal Processing, Wiley, (2001).
- [2] Jianzhong Li: An optimized watermarking scheme using an encrypted gyrator transform computer generated hologram based on particle swarm optimization, Optical Society of America, Volume 22, Issue 8, pp.10002-10016 (2014).
- [3] Liu, Z., Chen, D., Ma, J., Wei, S., Zhang, Y., Dai, J., Liu, S., Fast algorithm of discrete gyrator transform based on convolution operation, Optik, 122(10), pp. 864-867 (2011).
- [4] S. Mallat: A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press (2009).
- [5] T. Minamoto and R. Ohura: A Blind Digital Image Watermarking Method Based on the Dyadic Wavelet Transform and Interval Arithmetic, Applied Mathematics and Computation, Volume 226(1), pp. 306-319 (2014).

- [6] T. Minamoto, K. Tsuruta and S. Fujii : Edge-preserving image denoising methods based on dyadic lifting schemes, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.2, 48-58 (2010).
- [7] Rodrigo, J.A., Alieva, T., Calvo, M.L., Gyrator transform: Properties and applications, Optics Express, Volume 15, Issue 5, Pages 2190-2203 (2007).
- [8] R. Simon and K. B. Wolf ,Structure of the set of paraxial optical systems J. Opt. Soc. Am. A 17, 342-355 (2000).
- [9] Poonam,Shaifali M, Arora: A DWT-SVD based Robust Digital Watermarking for Digital Images, International Conference on Computational Intelligence and Data Science (ICCIDS 2018) (2018).
- [10] Wang, Z. Bovik, A, C. Sheikh, H, R. and Simoncelli, E,P.: Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, IEEE Transactions on Image Processing, Vol.13, No.4, pp.600-612 (2004).
- [11] 神奈川工科大学, 情報学部情報学科, 信号処理応用研究室, http://www.ess.ic.kanagawa-it.ac.jp/app_images_j.html (2021/11/1 アクセス).
- [12] 情報ハイディング及びその評価基準委員会, IHC Evaluation Criteria and Competition, Version6, <https://www.ieice.org/iss/emm/ihc/en/> (2020/8/5 アクセス).