

# 複素グラフ表現を用いた色差復元に基づく画像ステガノグラフィの提案

A Proposal for Image Steganography Based on Colorization Using Complex Graph Fourier Transform

新名菜里\*  
Shiori Niina

雨車和憲\*  
Kazunori Uruma

## 1 はじめに

画像ステガノグラフィはデータハイディングの一種であり、情報が隠されていること自体を気づかせずに画像に別の情報を埋め込むことを目的としている。近年では、画像符号化技術に基づいた画像ステガノグラフィの新しいアルゴリズムが検討されている。以下、埋め込み先となる RGB 画像をカバー画像、埋め込む情報であるグレースケール画像を秘密画像、カバー画像に秘密画像を埋め込んだ RGB 画像をステゴ画像、ステゴ画像から埋め込んだ情報を取り出したものを抽出画像と定義する。

著者らの研究グループでは、画像ステガノグラフィの新しい手法として、グラフ信号処理を用いた画像の colorization 符号化技術を応用した手法を提案している [1]。この手法では、実数値のグラフ表現が利用されている。他方、文献 [2] では複素信号をグラフ信号値とした複素グラフフーリエ変換が提案されており、実数だけでなく複素数を用いたグラフ信号処理を実現している。

本研究では複素グラフを用いたグラフ信号値復元による色差復元に基づく新しい画像ステガノグラフィの手法を提案する。カバー画像の画素値を複素数のグラフ信号値として、秘密画像を埋め込み、ステゴ画像を生成する。これにより画素値の表現の幅が広がり、視覚的な劣化を抑えることや、抽出の精度が向上することが期待される。標準画像を用いた数値実験により、実グラフを用いた手法との比較において、提案手法の有効性を示す。

## 2 関連研究

### 2.1 色差復元に基づく画像ステガノグラフィ

文献 [1] では、既知の色差値と輝度画像を用いて、実グラフによるグラフ信号値復元に基づき未知の色差値を復元する手法に基づいた画像ステガノグラフィの手法が提案されている。この手法では、輝度画像に対し領域分割を行い、2 種類のグラフから得られるグラフフーリエ変換行列によりカラー化行列を算出する。

まず、 $N$  画素の輝度画像を  $N'$  個の領域に分割し、各領域の中心点を重要画素と定義する。このとき、これらの重要画素を頂点としたグラフをグローバルグラフと定義し、その接続関係を表す隣接行列  $W_G \in \mathbf{R}^{N' \times N'}$  は次のように定義される、

$$W_G(s, t) = \exp(-\alpha |g_y(s) - g_y(t)|). \quad (1)$$

ここで、 $g_y(\cdot)$  は  $\cdot$  番目の重要画素における輝度値、 $\alpha$  は正の定数である。この隣接行列  $W_G$  からグローバルグラフフーリエ変換行列  $G \in \mathbf{R}^{N' \times N'}$  が求められる。

また、重要画素と画像上の  $j$  番目の画素 ( $j = 1, \dots, N$ ) を頂点とした  $N$  個のグラフを、ローカルグラフと定義する。このとき、 $j$  番目のローカルグラフにおけるグラフ信号値を、 $\mathbf{h}_y^{[j]} \in \mathbf{R}^{(N'+1)}$  とし、隣接行列  $W_H^{[j]} \in \mathbf{R}^{(N'+1) \times (N'+1)}$  は次式で定義される、

$$W_H^{[j]}(s, t) = \begin{cases} \exp(-\beta |\mathbf{h}_y(s) - \mathbf{h}_y(t)|), & (s, t) \in \Omega_j \\ 0 & otherwise \end{cases}. \quad (2)$$

ここで、 $\beta$  は正の定数である。 $\Omega_j$  は画素集合であり、画像上の  $j$  番目の画素と、 $j$  番目の画素を含む領域に隣接する領域内に位置する重要画素からなる集合である。この隣接行列  $W_H^{[j]}$  から  $j$  番目のローカルグラフフーリエ変換行列  $H^{[j]} \in \mathbf{R}^{(N'+1) \times (N'+1)}$  が求められる。次に、 $Q'$  を  $N'$  より小さい正の定数とし、部分行列  $H_1^{[j]} \in \mathbf{R}^{N' \times Q'}$  と  $H_2^{[j]T} \in \mathbf{R}^{Q'}$  を用いて、 $j$  番目の行ベクトルを  $H_2^{[j]T} H_1^{[j]\dagger}$  としたローカルグラフフーリエ変換行列  $H \in \mathbf{R}^{N \times N'}$  が求められる。以上により得られたグローバルグラフフーリエ変換行列  $G$  とローカルグラフフーリエ変換行列  $H$  からカラー化行列  $C = HG \in \mathbf{R}^{N \times N'}$  が求められ、グラフスペクトル  $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^{N'}$  を用いて画像全体の色差値  $\mathbf{f}_u^{(0)} \in \mathbf{R}^N$  の復元は次のように行われる、

$$\mathbf{f}_u^{(0)} = C\mathbf{s}. \quad (3)$$

文献 [1] ではこのカラー化行列  $C$  を用いた画像ステガノグラフィの手法が提案されている。

### 2.2 複素グラフフーリエ変換

文献 [2] では、複素信号のグラフフーリエ変換が定義されている。まず、信号値を  $\mathbf{f} \in \mathbf{C}^n$  としたグラフの隣接行列  $W \in \mathbf{C}^{n \times n}$  をエルミート行列、すなわち  $W = W^H$  と定義する。また、次数行列  $D \in \mathbf{R}^{n \times n}$  は  $D_{s,s} = \sum_{t=1}^n \text{Re}[W_{s,t}]$  で定義される。複素グラフラプリアン行列  $L \in \mathbf{C}^{n \times n}$  は  $L = D - W$  で定義され、エルミート性を保つ。  $L$  はエルミート行列であるため、ユニタリ行列  $U \in \mathbf{C}^{n \times n}$  により  $L = UAU^H$  と対角化できる。ここで、 $\Lambda \in \mathbf{R}^{n \times n}$  は  $L$  の実固有値を対角要素に持つ行列である。よって、 $U$  は  $L$  の固有ベクトルを列に持つユニタリ行列であり、複素グラフフーリエ変換は以下のように定義される、

$$\mathbf{s}_c = U^H \mathbf{f}. \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{s}_c \in \mathbf{C}^n$  はグラフスペクトルであり、逆グラフフーリエ変換は以下のように定義される、

$$\mathbf{f} = U\mathbf{s}_c. \quad (5)$$

\*工学院大学 Kogakuin University

### 3 提案手法

文献 [1] では、実数のみを用いた画像ステガノグラフィの手法が提案されている。しかし、複素数を用いることで実数だけでなく虚数での表現も加わり、視覚的な劣化をさらに抑えることが期待される。そこで本研究では、複素グラフを用いた色差復元に基づく埋め込み手法を提案する。また、本研究ではカバー画像のエッジ部分の画素に限定して埋め込みを行うことで、視覚的な劣化を抑制する手法を提案する。

まず、埋め込みについて述べる。文献 [1] の手法を拡張してグローバルグラフとローカルグラフそれぞれの頂点とグラフ信号値を設定する。信号値を  $\hat{g}_y \in \mathbb{C}^{N'}$  としたグローバルグラフの隣接行列  $\hat{W}_G \in \mathbb{C}^{N' \times N'}$  を次のように定義する、

$$\hat{W}_G(s, t) = \exp(-\gamma |Re[\mathbf{g}_y(s)] - Re[\mathbf{g}_y(t)]|) + i(\exp(-\delta |s - t|)), \quad (6)$$

また、信号値を  $\hat{h}_y^{\{j\}} \in \mathbb{C}^{(N'+1)}$  とした  $j$  番目の画素におけるローカルグラフの隣接行列  $\hat{W}_H^{\{j\}} \in \mathbb{C}^{(N'+1) \times (N'+1)}$  の  $(s, t) \in \Omega_j$  の場合を次のように定義する、

$$\hat{W}_H^{\{j\}}(s, t) = \exp(-\epsilon |h_y(s) - h_y(t)|) + i(\exp(-\zeta |s - t|)). \quad (7)$$

ここで、 $\gamma, \delta, \epsilon, \zeta$  は正の定数である。これらから複素カラー化行列  $\hat{C} \in \mathbb{C}^{N \times N'}$  を得る。次に、輝度画像からエッジを抽出し、埋め込みに用いる画素を決定する。決定された画素の色差値  $\mathbf{f}_u^{(1)} \in \mathbb{C}^T$  と、複素カラー化行列  $\hat{C}$  の行ベクトルがエッジ抽出により決定された画素に対応した部分行列である  $\hat{C}_1 \in \mathbb{C}^{T \times N'}$  を用いてグラフフーリエ変換を行いグラフスペクトル  $\hat{\mathbf{s}} \in \mathbb{C}^{N'}$  を算出する、

$$\hat{\mathbf{s}} = \hat{C}_1^H \mathbf{f}_u^{(1)}. \quad (8)$$

ここで、 $T$  は埋め込みに用いる画素数である。得られたグラフスペクトル  $\hat{\mathbf{s}}$  に秘密画像を埋め込む。新たなグラフスペクトルを  $\tilde{\mathbf{s}} \in \mathbb{C}^{N'}$  とし、 $\hat{C}_1$  を用いて逆グラフフーリエ変換を行う、

$$\mathbf{f}_u^{(1)} = \hat{C}_1 \tilde{\mathbf{s}}. \quad (9)$$

カバー画像のエッジ部分の色差値  $\mathbf{f}_u^{(1)}$  を  $\mathbf{f}_u^{(1)}$  に置き換えることで、ステゴ画像の色差画像を得る。

抽出について述べる。埋め込み画素の特定までは埋め込みと同じ操作を行う。次に、特定した画素の色差値  $\mathbf{f}_u^{(1)}$  と  $\hat{C}_1$  を用いてグラフフーリエ変換を行い、 $\tilde{\mathbf{s}}$  から抽出画像を得る、

$$\tilde{\mathbf{s}} = \hat{C}_1^H \mathbf{f}_u^{(1)}. \quad (10)$$

### 4 数値実験

本研究では提案手法の有効性を示すため、カバー画像として 6 枚の RGB 画像、秘密画像として 6 枚のグレースケール画像の計 12 枚を用いて、従来手法との比較を行う。カバー画像と秘密画像のサイズはそれぞれ  $128 \times 128$ ,  $20 \times 20$  である。比較について、カバー画像とステゴ画像、秘密画像と抽出画像を PSNR を用いて行った。なお、カ



図 1: 提案手法の結果の例

表 1: PSNR[dB] を用いた比較 ステゴ画像/抽出画像

	従来手法	提案手法
Ballon-Mandrill	52.80/49.66	<b>53.55/50.02</b>
Earth-Aerial	<b>48.63</b> /49.28	47.99/ <b>49.74</b>
Pepper-Milkdrop	<b>49.19</b> /49.56	45.72/ <b>49.84</b>
Tokyo-Parrots	<b>48.26</b> /49.65	45.80/ <b>49.66</b>
Girl-Airplane	45.3343/49.80	<b>46.05/49.89</b>
Couple-Sailboat	<b>48.88/49.70</b>	47.56/49.63

バー画像とステゴ画像はそれぞれグレースケール変換した後に比較した。表 1 に数値結果、図 1 に結果の一例として Balloon-Mandrill の埋め込みと抽出の結果を示す。図 1 は埋め込みと抽出が適切に行われている画像であり、劣化が抑えられていることが分かる。表 1 から、複素表現することで、ステゴ画像の劣化を一定程度に抑えつつ、抽出画像の劣化を小さくできていることが分かる。

### 5 まとめ

本研究では、複素グラフを用いた埋め込み手法を提案した。数値実験ではステゴ画像の劣化をある程度に抑えつつ、秘密画像を精度良く抽出できることを示した。秘密画像が劣化してしまうことは、情報埋め込みという特性上、大きな問題であると考えられるので、その点においては本手法は優位であると考えられる。今後の課題として、パラメータの適切な設定やグラフの構成方法など、複素グラフを用いた画像ステガノグラフィの精度向上のための調整があげられる。

### 参考文献

- [1] K. Uruma, K. Konishi, T. Takahashi, and T. Furukawa, "A Novel Approach to Image Steganography Based on the Image Colorization," 2019 IEEE Visual Communications and Image Processing, pp. 1-4, 2019.
- [2] Jordi Belda, Luis Vergara, Gonzalo Safont, Addison Salazar and Zuzanna Parcheta, "A New Surrogating Algorithm by the Complex Graph Fourier Transform (CGFT)," Entropy, Vol. 21, pp.759, August 2019.