

ベクトル型 2 次元電子地図の周波数表現に埋め込む電子透かし

植田 寛郎¹, 大淵 竜太郎², 遠藤 州³

k7026@kki.yamanashi.ac.jp, ohbuchi@acm.org, ENDOSHU@jp.ibm.com

¹ 山梨大学大学院工学研究科電子情報工学専攻, 山梨県甲府市武田 4-3-11

² 山梨大学工学部コンピュータ・メディア工学科, 山梨県甲府市武田 4-3-11

³ 日本アイ・ビー・エム株式会社 GIS 事業推進部, 東京都中央区日本橋箱崎町 19-21

要旨

マルチメディアデータの拡大・普及にとともに、それらの著作権保護の必要性が増大してきている。本論文では、折れ線や多角形など 2 次元の幾何要素の集合として図形を表すベクトル型 2 次元電子地図に対し、電子透かしを埋め込む手法を提案する。本手法の特徴は、幾何要素をなす頂点の集合を点群としてとらえ、これら点群を Delaunay メッシュ化し、そのメッシュの周波数領域における表現を変更することで透かしを埋め込む。本論文では、本手法で埋め込まれた透かしが地図の主観的品質に与える影響、複合的攻撃も含めた各種の攻撃が本手法で埋め込まれた透かしに与える影響、などについて定量的な評価を行った結果を報告する。

Digital Watermarking of Vector Digital Maps by Using Mesh-Spectral Transform

Hiro Ueda¹, Ryutarou Ohbuchi², and Shu Endo³

K7026@kki.yamanashi.ac.jp, ohbuch@acm.org, ENDOSHU@jp.ibm.com

¹ Graduate School of Eng, University of Yamanashi, 4-3-11 Kofu, Yamanashi, Japan.

² Computer Science Department, University of Yamanashi, 4-3-11 Kofu, Yamanashi, Japan.

³ IBM Japan, 19-21 Hakosaki-cho, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, Japan.

Abstract

It has become increasingly important to protect intellectual property rights of multimedia data objects. In this paper, we evaluate a method to embed digital watermark into 2D vector digital maps in its frequency-domain representation. In the proposed method, vertices of the 2D vector digital maps representing building outlines, contour lines and other ground objects are treated as a 2D point set. The point set is Delaunay triangulated first, and the mesh's frequency coefficients are computed using mesh spectral analysis technique. Modification of the coefficients embeds the watermark. We report evaluation results of the distortion and noticeability of the watermark as well as robustness of the watermark under various attacks.

1. はじめに

近年、コンピュータの発達により地理情報システム(GIS: Geographic Information Systems)が様々な分野に普及した。地理情報システムとは、地理的位置を手がかりに、位置に関する情報を持ったデータ(空間データ)を総合的に管理・加工し、視覚的に表示することにより、様々な場面に置いて高度な分析や迅速な判断を可能にするシステムである。災害対策システムや都市計画と言った行政活動、出店・販売計画と言った企業活動、個人生活におけるカーナビゲーションシステムなどがその使用例としてあげられる。

地理情報システムでは電子地図がそのシステ

ムの中核となる。2 次元の電子地図は、ラスタ型電子地図とベクトル型電子地図とに大別される。前者は画素の 2 次元配列、つまり 2 次元画像である。後者のベクトル型電子地図とは、建物の輪郭、道路、等高線と言った地物を、頂点及びその集合からなる多角形や折れ線などの幾何形状要素の組み合わせとして表したものである。ベクトル型電子地図は、拡大・縮小・回転などの処理を行っても品質の低下が無い。これはラスタ型電子地図と比較した場合の大きな利点である。

ベクトル型電子地図は、初期作成や更新などに自動化が困難な部分が多く、その作成に多くの労力や費用を要する。反面、デジタルデータ

としての性質上, 不正なコピーや再配布が容易である. これらの不正行為により知的所有権の侵害が行われると, 地図データという公共性の高い情報の公正な流通が阻害されかねず, 知的所有権の保護が重要となる.

デジタルデータの知的所有権保護技術の一つに電子透かしがある. 電子透かしとは, 元となるデータに対し微小な変化を加え, 著作権情報等を埋め込み, 必要に応じて埋め込んだ情報を抽出する技術のことである. これまで画像, 音声, 動画などに対する電子透かし技術が提案されている[松井 98, Katzenbeisser 00, Cox 01 等].

しかし, ベクトル型電子地図への電子透かしは筆者の知る限り比較的少ない[坂本 99, 栗原 00, 北村 00, 遠藤 01]. 筆者らはベクトル型電子地図を矩形領域で分割し, 矩形内の頂点を一様な方向に動かすことで透かし情報を埋め込む大域特徴量埋め込み法を提案した[Ohbuchi02, 植田 02a]が, その妨害耐性は十分ではない.

本論文では, 2 次元ベクトル電子地図を対象とし, その周波数領域の表現を変更することによって埋め込む電子透かし手法について述べる. 手法については[植田 02b]で既に述べたが, 本稿では, 透かしによる歪とその主観的評価や, 複合攻撃に対する耐性も含めた評価の結果を中心に述べる. 以下, 第 2 章に本手法の詳細を, 第 3 章に評価実験とその結果を述べる. 第 4 章にまとめと今後の課題を述べる.

2. スペクトル変換による電子透かし

ベクトル型電子地図を対象とした本論文の透かし手法の概略は以下ようになる(図 1 参照). まず, 地図上の頂点全てを Delaunay 三角形分割し, メッシュに変換する. これは後述のスペクトル変換[Ohbuchi01]がメッシュを前提とするためである. 次に領域分割を行い, 地図を幾つかの矩形領域に分割し, スペクトル変換処理の効率化を計ると共に, 複数の領域に同一の透かし情報を埋め込むことで地図の切り取りに対する耐性を持たせる. 領域分割の後, 各領域に対しスペクトル変換を行い, 得られたスペクトル係数を透かし情報で変更して透かしを埋め込む. 変更後のスペクトル係数をスペクトル逆変換して得られた頂点の座標を地図に反映させると透かしの入った地図が生成される.

透かしの取り出しは, 保存しておいた(透かし

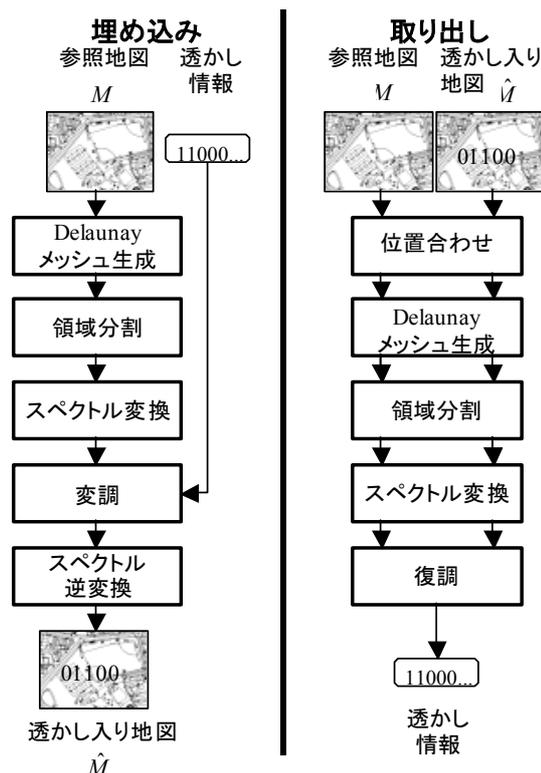


図 1. 透かし処理の流れ.

の入っていない元地図(以後, これを参照地図と呼ぶ)と, 透かしが施され, さらに攪乱が加えられた可能性のある地図(以後, これを透かし地図と呼ぶ)とを比較して行う. 使用法によるが, 参照地図は信頼できる第 3 者機関に預託しておくことも考えられる. 透かし地図には平行移動や拡大, 縮小, 回転, 切り取りなどが加えられている可能性があるため, 比較に先立ち, 2 つの地図の位置合わせを行う. 位置合わせは, 2 つの地図から選択した複数の目標地物(以後, ランドマークと呼ぶ)の頂点間の距離の合計が最小になるよう, 微小な幾何変換を反復して加えることで実現する. 位置合わせの後, 参照地図の上に埋め込みで使用したのと全く同じ三角形分割, 領域分割を行い, この結果を透かし地図にも当てはめる. それぞれの領域にスペクトル変換を行い, 得られたスペクトル係数を参照地図と透かし地図の間で比較することで透かしを取り出す.

3.1 メッシュ生成

スペクトル変換を行うためには全ての頂点が接続されている必要がある. しかし, ベクトル型電子地図は, 頂点, 及びその集合である多角形, 折れ線などの幾何要素で各地物が定義されて

いる。しかし全頂点が接続されているわけではなく、そのままではメッシュスペクトル変換は適用できない。そこで、地物を構成する頂点全体を点群と見なし、その点群から三角形メッシュを生成し、このメッシュをスペクトル変換する。

三角形分割には Delaunay 三角形分割[de Berg97]を使用した。Delaunay 三角形分割とは内角の最小角を最大にするように分割する三角形分割手法である。Delaunay 三角形分割は2次元平面上にある頂点群に対し、一意に分割が定まる。参照地図(図 2 左)に Delaunay 三角形分割をほどこした例を図 2 右に示す。



図 2. 参照地図(左)と、その頂点から計算した Delaunay メッシュ(右)。

3.2 領域分割

本透かし手法で使用するスペクトル変換は固有値分解を必要とする。固有値分解は計算量が多い(例えば、よく知られた Jacobi 法などでは頂点数 n に対し $O(n^3)$ で増える)。ベクトル型電子地図は地図により地物の密度が異なるが、密なもので 2 万程度、粗なもので 3 千程度の頂点が地図中に存在する。そこで、地図を頂点数数百程度の小領域に分割することで計算量を低減する。また、地図を複数の小領域に分割し、それぞれの領域に同一の透かし情報を埋め込むことで攪乱の 1 つである切り取りに対し耐性を持たせることも出来る。

本手法の領域分割には KD 木(2次元 KD 木)分割を使用した。KD 木は、 x 座標値に関して頂点数が半数になるよう分割し、次に分割されたそれぞれの領域の y 座標値に関して頂点数が半数になるよう分割する。さらに、再び x 座標値に関して分割する、と言う操作を領域に含まれる頂点数が一定数になるまで続ける。これにより、各領域に含まれる頂点数がほぼ一定の複数の領

域の直和に分割することが出来る。

3.3 スペクトル変換

メッシュスペクトルは、頂点の接続情報で定義されたメッシュ Laplacian (ラプラシアン) 行列に対し固有値分解を施し、得られた固有ベクトルに頂点座標を射影して得られた係数からなる。メッシュラプラシアン行列には幾つかの定義があるが、本手法では Biggs[Biggs93]が定義したメッシュラプラシアン行列(以後 Laplacian 行列)を用いた。

Laplacian 行列 L は、

$$L = I - RA, \quad (1)$$

で定義される。 I は単位行列である。 A はメッシュの頂点の隣接行列で、次のように定義される。

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{頂点 } i \text{ と } j \text{ が隣接} \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (2)$$

また R は対角要素に頂点 i の次数 d_i の逆数 $R_{ii} = 1/d_i$ を持つ行列である。

n 個の頂点からなるメッシュから求まるメッシュラプラシアン行列を固有値分解すると、 n 個の固有値とそれに対応する n 個の n 次元固有ベクトルが得られる。 n 個の頂点座標をその x, y 各成分ごとに固有ベクトルに射影するとメッシュのスペクトル係数が得られる。

3.4 変調

本手法では、スペクトル変換によって得られたスペクトル係数値を透かし情報に応じて変更して透かしを埋め込む。埋め込みビット列の j ($j = 0, 1, \dots, n-1$) 番目のビット a_j (値は $\{0, 1\}$ を取る) はランダムノイズなどに対する頑強性向上のため、 c 回反復し、埋め込みシンボル b_i とする。

$$b_i = a_j, \quad j \cdot c \leq i < (j+1) \cdot c. \quad (3)$$

b_i は $\{0, 1\}$ から、 $\{-1, 1\}$ の値をとる透かしシンボル b'_i に変換される。これらの透かし情報をスペクトル係数 S の i 番目の成分の振幅 s_i に埋め込む。変更された振幅 \hat{s}_i は、次のように計算される。

$$\hat{s}_i = s_i + b'_i \cdot p_i \cdot \alpha. \quad (4)$$

p_i : あるシード値から生成された $\{-1, 1\}$ の値をとる 2 値の擬似乱数系列。

α : 変調振幅。

変調振幅 α は実験結果から地図の品質に影響が出ない程度の値を選んでいる。

この変調後のスペクトル係数 \hat{s}_i をスペクトル逆

変換した結果、すなわち、スペクトル変換で得られた固有ベクトルと係数 \hat{s}_i の線形結合が新たな頂点座標値となる。

3.5 位置合わせ

透かし地図には幾何変換が加えられている可能性があるため、透かしの取り出しに先立ち、透かし地図に加えられた Affine 変換を推定し、これを補正して透かし地図を参照地図に一致させる。今回透かし埋め込みの対象とした住宅地図では、一部の地物の頂点に建物の名前、建物の所有者あるいは居住者の名前である文字列が振られている。これらの文字列を検索すると透かし地図と参照地図で対応する地物を見つけることが出来る。これらの名前が振られた複数の目標地物の頂点座標対より、透かし地図に加えられた Affine 変換を推定し、補正する。この問題はよく知られた Affine matching 問題([Cox93, Rothe96]等)の最も簡単な場合である。2 次元 Affine 変換を 1 つ定めるには最低 6 個の頂点対が必要であるが、より多く(10 個から数 10 個程度)の頂点対があると、さらに正確な位置合わせが行える。

3.6 頂点の対応付け

位置合わせの後、参照地図の頂点と、透かし地図の頂点を、座標値を元に対応付ける。ここで、頂点を追加・削除したりする妨害の影響をできる限り排除するため、次のような処理を行う。

まず、頂点の追加による攪乱の影響を減らすため、透かし地図の頂点の中で、参照地図の頂点と座標が十分に近い頂点だけを使う。より具体的には、座標値が参照地図の頂点 v_r から半径 t の範囲にある透かし地図の頂点 v_w を「有効」として使用する。もしそのような頂点が透かし地図に複数個あるときは、 v_r に最も近いものを選ぶ。

頂点の削除に対応するためには、削除された頂点を透かし地図に追加する。追加する頂点の座標は、削除されたと判断された頂点の座標値とする。もちろんこの座標値は正しくないが、単に「ノイズの加わった頂点」として処理される。(参照地図は透かしを持たないので、空白地図から透かしが取り出される心配はない。)

3.7 復調

参照地図に対し、埋め込みに使用したのと同様に三角形分割、領域分割を行い、領域ごとの

メッシュラプラシアン行列を生成する。このメッシュラプラシアン行列を固有値分解して得られた固有ベクトルに透かし地図の頂点座標値を射影すると、透かし地図のメッシュスペクトル係数 \hat{s}_i が得られる。(参照地図と透かし地図の頂点は、上記の頂点对応付けおよび頂点復元により対応付けられている。)同じ固有ベクトルに参照地図の頂点座標値を射影すると参照地図のスペクトル係数 s_i が得られる。 \hat{s}_i と s_i の差分に式(4)で用いた擬似乱数系列 p_i を掛け、反復回数の分だけ和を取る。

$$q_j = \sum_{i=j-c}^{(j+1)c-1} (\hat{s}_i - s_i) \cdot p_i = \sum_{i=j-c}^{(j+1)c-1} b'_i \cdot \alpha \cdot p_i^2. \quad (5)$$

ランダムノイズなどの攪乱を無視できるとすると、 q_j は、式(6)のようになる。

$$q_j = c \cdot \alpha \cdot b'_j. \quad (6)$$

式(6)より、反復回数 c 、振幅 α は常に正の数であるから、 q_j の正負を判定することによって透かしビット a_j が取り出せる。

3. 評価実験

3.8 振幅による歪みの評価

変調振幅 α の違いによるベクトル型電子地図の歪みに関しての実験を行った。3 種類の振幅を使用した透かしを 6 種類の地図に埋め込みその歪みを評価した。評価基準としては、人間の主観による評価と、画像の客観評価基準として用いられる PSNR 値を使用した。主観評価は男性 8 名に参照地図と透かし地図を見比べてもらい、「地図の歪みが気にならないか(=10)・気になるか(=1)」を 10 段階で評価してもらい、その平均を求めた。客観評価である PSNR 値は以下の式で求めた。

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} (M \times \text{MAX}^2 / \sum_{i=0}^{M-1} (v_i - v'_i)) \quad (7)$$

この時、MAX を 10、M を透かしの埋め込みに使用した頂点数とした。結果を表 1 に示す。

表 1 の結果から今回の手法では主観評価と PSNR 値による客観評価は比例関係にあると言える。このことから、本手法の歪みを評価する基準として PSNR 値を使用出来ると考えられる。

表 1. 歪みの評価結果

振幅 α	1	1.5	2
主観評価	9.1	8.2	7.0
PSNR 値	19.6	16.9	14.5

3.9 攪乱に対する頑強性

各種攪乱をほどこした時の、攪乱に対する透かしの頑強性について実験を行った結果を以下に示す。実験条件として、スペクトル変換による周波数領域への透かしは、一領域当りの頂点数を 480 以上とし、透かし情報を 128bit、領域当りの繰り返し回数を 3、変調振幅 α を 1 として埋め込みを行った。また、比較のため、以前の手法である大域特徴量埋め込み法の実験データも合わせて載せる。

ベクトル型地図データは、縮尺 1/1500、セルの範囲 750×500m を整数座標値 7500×5000 で表したものを使用し、地物の密度が異なる 6 種類の地図に対し実験を行った結果を平均した。

攪乱の種類は、

- 平行移動: 全ての頂点座標値を同じ値だけ移動する。
- 拡大: 全ての頂点座標値を一様な倍率で移動する。
- 縮小: 全ての頂点座標値を一様な倍率で移動する。ただし、端数となった頂点座標値は四捨五入を行い整数とする。
- 回転: 全ての頂点座標値を一様な角度で回転移動する。回転後の座標値は整数へ四捨五入する。
- 幾何変換: 平行移動と縮小、回転を地図に加える。端数となった座標値は四捨五入を行い整数とする。
- 頂点追加: 表示した際、地図の見た目に変化が少なくなるように直線上に新たな頂点を追加する。
- ランダムノイズ重畳: 頂点座標値にノイズを加え頂点座標値を変化させる。
- 切り取り: 地図から指定された一定の範囲を図 3 の 6 種のパターンで切り出す。
- 切り取り+幾何変換: 切り取りを行った地図に平行移動と縮小を加える。
- 切り取り+回転: 切り取りを行った地図に回転を加える。

である。切り取りは切り取り方を 6 種類設定した。

ランダムノイズの振幅の値は実空間におけるものである。切り取りの種類は図 3 に示す。実験結果を表 2 に示す。

表 2. 透かしの頑強性

攪乱の種類	周波数領域	大域特徴量
平行移動	0.0%	0.0%
拡大	0.0%	0.0%
縮小	0.0%	0.0%
回転	0.0%	0.0%
幾何変換	0.0%	1.0%
頂点追加	0.0%	0.0%
ノイズ(振幅 50cm)	4.3%	8.5%
切り取り 1	0.0%	1.2%
切り取り 2	0.4%	7.0%
切り取り 3	0.0%	6.8%
切り取り 4	0.0%	16.7%
切り取り 5	0.4%	11.3%
切り取り 6	15.1%	35.9%
切り取り 3+幾何	1.8%	11.1%
切り取り 3+回転	0.3%	9.9%

表 2 から、周波数領域での透かしの方が、大域特徴量埋め込み法より攪乱に対する耐性が高いことがわかる。また、周波数領域での透かしは平行移動や拡大、縮小、回転を組み合わせた幾何変換に対して耐性を持っていると言える。さらに、ランダムノイズ重畳や切り取り、切り取りと幾何変換の組み合わせに対してもある程度の耐性を持っていると言える。もっとも誤り率の高かったパターン 6 の切り取りでは透かし情報 15%が

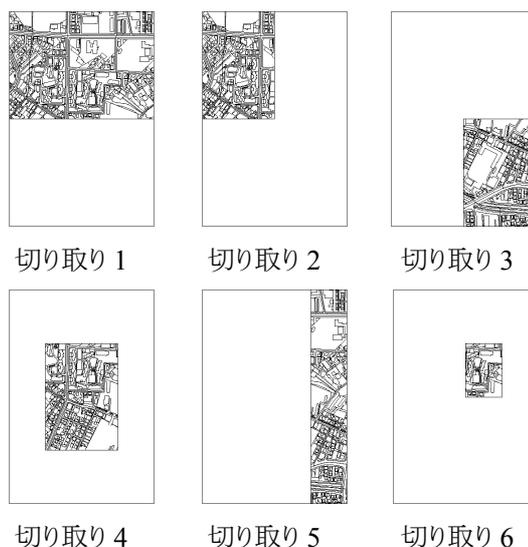


図 3. 地図データに行った切り取りの種類。

破損した。しかし図 3 より分かるようにパターン 6 は面積比で元地図の 1/16 であり, ある程度の透かしの破壊は当然である。地図の利用目的に依存するものの, 全体として, 本手法の透かしはある程度実用的な攻撃耐性を持つと言えるだろう。

4. まとめと今後の課題

本論文では, ベクトル型電子地図を対象とした周波数領域で埋め込む, 頑強な, 秘密透かしの手法を提案した。提案手法は, ベクトル型電子地図の頂点に対し三角形分割を行うことでメッシュを生成し, 領域分割を行った後, スペクトル変換を行行い, その係数に透かしの埋め込む。透かしの取り出しは, 参照地図と透かしが入った(さらに攻撃を受けた可能性のある)地図とを比較することで行う。

振幅による地図の歪みに対する主観評価と PSNR による客観評価を行った結果, 本手法は主観評価と客観評価の間で比例関係にある事を示した。今後, 他の手法と比較を行い PSNR 値が客観評価の基準として使用出来るか確認する必要があると言える。

頑強性に対する評価の結果, 提案手法はランダムノイズ重畳, 頂点の付加, 回転, 拡大・縮小や平行移動などの幾何変換に対してある程度の頑強性を示した。また, 地図の部分的切り取り, 及び切り取りと幾何変換との組み合わせに対してもある程度の頑強性を示した。

5. 謝辞

本研究は, 情報処理振興事業協会 先端的情報化推進基盤整備事業の成果の一部を利用させて頂いた。実験に用いたベクトル型地図データは事前の承諾のもと, 株式会社ゼンリンの住宅地図データを使用させて頂いた。

6. 参考文献

[Biggs93] N. Biggs, Algebraic Graph Theory (2ndEd.), Cambridge University Press, 1993.
[Cox93] G. S. Cox, G. De Jager, A survey of point pattern matching techniques and a new approach to point pattern recognition, Proc. of South African Symposium on Communications and Signal Processing 1993, pp. 243-248.
[Cox01] Ingemar J. Cox, Matthew L. Miller, and Jeffrey A. Bloom, DIGITAL WATERMARKING, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[deBerg97] M. de Berg, M. van Kreveld, M. Overmars, O. Schwarzkopf, Computational Geometry -- Algorithms and Applications, Springer, 1997.

[Johnson00] Neil F. Johnson, Zoran Duric, and Sushil Jajodia, Information Hiding: Steganography and Watermarking--Attacks and Countermeasures, Kluwer Academic Publishers, 2000.

[Katzenbeisser00] S. Katzenbeisser, F. A. P. Petitcolas, Digital Watermarking, Artech House, London, 2000.

[Ohbuchi01] R. Ohbuchi, S. Takahashi, T. Miyazawa, and A. Mukaiyama, Watermarking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain, in Proc. of the Graphics Interface 2001, pp. 9-17, Ontario, Canada, June, 2001.

[Ohbuchi02] Ohbuchi, R., Ueda, H., Endo, Shu.,: Robust Watermarking of Vector Digital Maps, IEEE Conference on Multimedia and Expo 2002 (ICME 2002), August 26-29, Lausanne, Switzerland, (Aug. 2002).

[Rothe96] I. Rothe, H. Suesse, K. Voss, The method of normalization to determine invariants, IEEE Trans. on PAMI, Vol. 18, No. 4 (1996), pp. 366-377.

[植田 02] 植田 寛郎, 大淵 竜太郎, 遠藤 州, ベクトル型地図データへの電子透かし埋め込み手法, 情報処理学会論文誌, 第 43 巻 第 8 号, pp. 2478-2488, 2002 年 8 月。

[植田 02b] 植田 寛郎, 大淵 竜太郎, 遠藤 州, スペクトル変換を使用した 2 次元ベクトル電子地図への電子透かし, 情報処理学会研究会報告 Vol.2002, (コンピュータセキュリティ. 19-5), pp. 25-30, 2002 年 12 月。

[遠藤 01] 遠藤 州, 増田 宏, 大淵 竜太郎, 金井 理, ベクトル型地図情報への電子透かし埋め込み技術開発, IPA Technology Expo 2001 成果報告集, 2001.

[北村 00] 北村 伊久裕, 金井 理, 岸波 建史, ウェーブレット変換に基づくベクトル型地図データへの電子透かし手法, 2000 年度地理情報システム学会講演論文集, 9 巻, pp.417-421, 2000.

[栗原 00] 栗原 誠, 柳井 紳, 小松 尚久, 有田 秀昶, ベクトル表記されたデータに対する電子透かし, 情報処理学会研究会報告 Vol.2000, No.36, (コンピュータセキュリティ. 9-1), pp. 1-5, 2000 年 5 月 10 日。

[坂本 99] 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, 情報処理学会第 59 回全国大会, 3X-9, 1999.

[松井 98] 松井 甲子雄, 電子透かしの基礎, 森北出版, 1998.