

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

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

地理情報システムの普及に伴い, その中核となる 2 次元ベクトル電子地図の知的所有権保護の重要性が増してきている. 本論文では, ベクトル電子地図に対して, デジタルデータの知的所有権保護技術の 1 つである電子透かしを適用することを検討する. 本論文の電子透かし手法は, 三角形メッシュ状に分割した地図に対しスペクトル変換を行い, 得られた係数を変更することで透かしの埋め込み. 本手法の電子透かしは頂点座標値への乱数値の重畳, 頂点の追加, 平行移動, 拡大, 縮小, 回転, 切り取り, その他の攪乱に対して耐性を持つ.

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

Hiro Ueda¹, Ryutarou Ohbuchi², and Shu Endo³

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

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

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

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

Abstract

With the increased use of geographical information systems, it has become ever more important to protect intellectual property rights of 2D vector digital maps. In this paper, we propose to apply *digital watermarking* in order to protect intellectual property of digital maps. The algorithm proposed in this paper embeds a watermark by modifying the geometry of the map in its “frequency” domain by using a technique called mesh spectral analysis. The watermark obtained by using this method show resiliency against such attacks as additive random noise, vertex insertion, rotation, scaling, translation, and cropping.

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) が急速に普及した. 地理情報システムとは, 地理的位置を手がかりに, 位置に結びついた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. より身近なところでは, 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, これらの作業に多くの労力や費用を必要とする. 反面, そのデジタルデータという性質上, 不正なコピーや再配布が容易にできるという側面を持つ. 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[植田 01, Ohbuchi02, 植田 02]。

本論文では、2 次元ベクトル電子地図を対象とした周波数領域での電子透かし手法を提案し、その実験による評価の結果を述べる。

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て本論文を締めくくる。

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我々の電子透かし手法の概略は以下になる。

スペクトル変換[Ohbuchi01]を行うために三角形分割で地図上の頂点を三角形の集合とする。次に領域分割を行い、地図を幾つかの矩形領域に分割する。これは、スペクトル変換の計算量が頂点数 n に対し $O(n^3)$ で増えることが知られているためである。そこで、頂点数が数百程度の複数の領域に分割することで計算量を削減する。また、地図を幾つかの領域に分割し、それぞれの領域に同一の透かし情報を埋め込むことで切り取りに対する耐性を持たせることが出来る。領域分割を行った後に、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に対し透かし情報を埋め込む。透かし情報を埋め込んだ係数に対しスペクトル逆変換を行い地図上に反映させることによりベクトル型電子地図に透かしを埋め込む。

透かしの取り出しは、保存しておいた(透かし

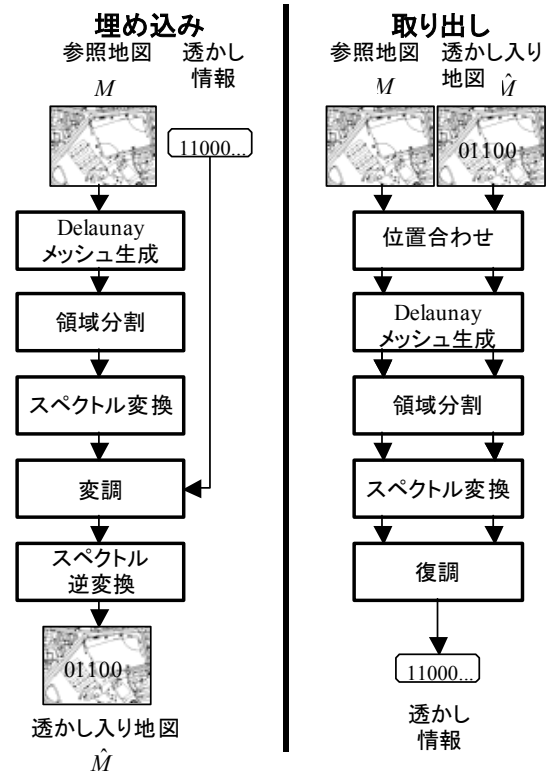


図 1. 透かし処理の流れ。

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。使い道によるが、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(10 個～数 10 個)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を誤差とし、これが最小二乗法的に最小になるよう、微小な回転、スケーリング、平行移動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。

2.1 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

三角形メッシュとして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が三角形メッシュではない。

そこで、本手法では地物を構成する頂点を点群と見なし、その点群に対し三角形分割を行い三角形メッシュを生成する。

本手法では三角形分割に 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という特性がある。本手法ではこの特性に着目し、Delaunay 三角形分割によりメッシュ生成を行う。参照地図に Delaunay 三角形分割をほどこした例を図 1 に示す。

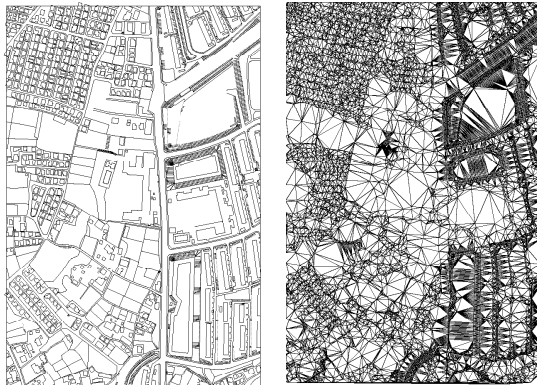


図 1. 参照地図(左)と Delaunay メッシュ(右)。

2.2 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様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が出来る。

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、という操作を領域に含まれる頂点数が一定になるまで続ける。これにより、各領域に含まれる頂点数がほぼ一定の分割を行うことが出来る。

2.3 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。

2.4 変調

本論文では、スペクトル変換によって得られたスペクトル係数値を変更して透かし情報を埋め込む。

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 となる.

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

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タの $\hat{s}_i$ を係数とした線形結合が元の頂点座標値である.

2.5 透かしの取り出し

本透かしは秘密透かしであり, 透かしの取り出しの際, 保存しておいた参照地図と透かし地図とを比較して透かしを取り出す.

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, 比較に先立ち, 透かし地図に加えられた Affine 変換を推定し, これを補正することで, 透かし地図を参照地図に一致させる位置合わせを行う. 透かしの対象とした住宅地図では, 地物のある頂点に建物の名前, 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ことで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.

位置合わせの後, 参照地図の上に埋め込みに使用したのと同じ方法で三角形分割, 領域分割を行いメッシュラプリアン行列を生成する. 次に参照地図から生成された, 行列を透かし地

図に当てはめる. 透かし地図から計算されたスペクトル係数 $\hat{s}_i$ と, 参照地図から計算されたスペクトル係数 s_i から, 差分をとり, 式(4)で使用した擬似乱数系列 p_i を掛け, 反復回数 c の分だけ和を取る.

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

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.

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

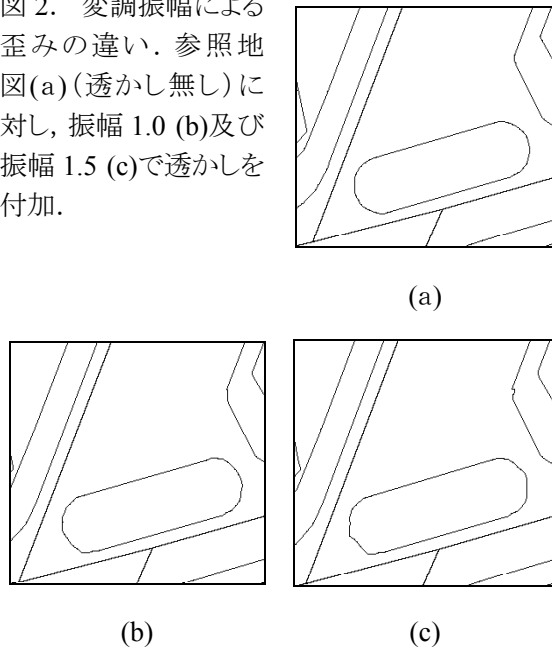
式(6)より, 反復回数 c , 振幅 α は常に正の数であるから, q_j の正負を判定することによって透かしビット a_j が取り出せる.

3. 実験

2.6 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. 図 2 がその結果である. 図 2(a),(b)は 1 つの領域に頂点数が 480 個以上としてスペクトル変換を行い, 透かしを埋め込んだ結果である. 振幅 1 の時(図 1(a))に比べ, 振幅を 1.5 と大きくした場合(図 1(b)), 明らかに地図上の地物に歪みが表れ, 品質が低下していることが分かる. 図 2 の結果から, 地図の品質を保持するためには, ある程度変調振幅を 1 程度に押さえる必要があると言える.

図 2. 変調振幅による歪みの違い. 参照地図(a)(透かし無し)に対し, 振幅 1.0 (b)及び振幅 1.5 (c)で透かしを付加.



2.7 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 $750 \times 500\text{m}$ 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.
- ファイル中の地物の順序入れ替え: ファイルに記述されている地物の順序を入れ替える.
- 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切り出す.

の 8 種類である. ランダムノイズは振幅を 2 種類, 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 1 に示す.

表 1. 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%	0.7%
回転	0.0%	0.1%
順序入れ替え	0.0%	0.0%
頂点追加	0.0%	0.0%
ノイズ(振幅 10cm)	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%	5.9%
切り取り 3	1.3%	5.9%
切り取り 4	0.0%	16.0%
切り取り 5	0.4%	9.3%
切り取り 6	15.1%	35.6%

表 1 の結果から, 周波数領域で透かしを埋め込んだ場合, 大域特徴量埋め込み法より結果が良いことがわかる.

表 1 から、スペクトル変換による周波数領域での透かしは平行移動や拡大、縮小、回転と言った幾何変換に対しては耐性を持っていると言える。また、ランダムノイズ重畳や切り取りに対してもある程度の耐性を持っていると言える。

ランダムノイズ重畳(振幅 50 cm)では、5%程度の透かし情報の破損がある。しかし、透かし情報を破壊するためにランダムノイズを乗せた地図データは明らかに品質が低下していた。

切り取り 8 に対しては、透かし情報の破損が

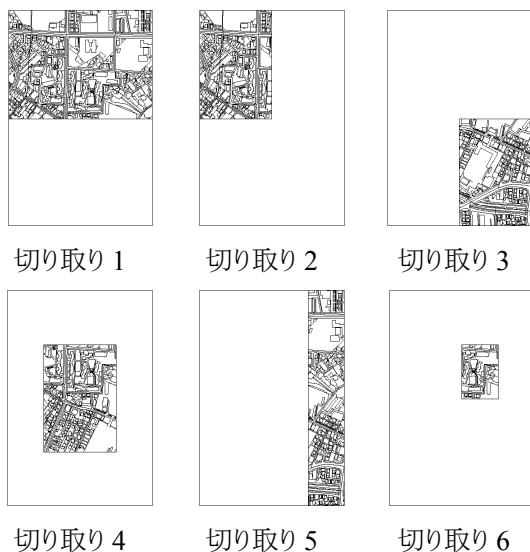


図 3. 地図データに行った切り取りの種類。

15%とあるが、図 2 から分かるように地図として残っている部分はかなり少なく、またそれ以外の切り取りに対しては破損は少ない。地図の利用目的に依存するが、ある程度実用性のある攻撃耐性を持つと言える。

4. まとめと今後の課題

本論文では、ベクトル型地図データを対象とした、頑強な、秘密透かしの手法を提案した。本透かし手法は、ベクトル型地図データの頂点に対し三角形分割を行いメッシュを生成し、領域分割を行った後、スペクトル変換を行う。得られた係数に対し、透かし情報を埋め込み、スペクトル逆変換を行ってその結果を地図上に反映させることで透かしの埋め込んだ。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。

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に対してもある程度の頑強性を示した。

今後の課題としては、幾つか複合した攪乱への頑強性の評価実験を行うことがあげられる。これは、透かし破壊に複数の攪乱を合わせることが考えられるからである。

また、本分野での研究を推進するためには、複数の 2 次元ベクトル電子地図の透かし手法を定量的に評価し比較するための枠組みを用意する必要がある。例えば、情報埋め込み容量の測定法、可知性の基準、誰もが入手し実験に使用できる評価用の標準地図データ群、標準的な攻撃のスイートなどを用意する必要があると思われる。

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いただいた。

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 01] 植田 寛郎, 大淵 竜太郎, 遠藤 州: 最
低頂点数を保証した領域分割を用いたベクトル型
地図データへの電子透かし, 情報処理学会研究
会報告, Vol.2001, No.35(グラフィックスと CAD.
103-5), pp.25-30 (Apr. 2001).

[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, 2002 年
8 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.