

# ベクトル型地図データへの電子透かし埋め込み手法

植田 寛 郎<sup>†</sup> 大淵 竜 太 郎<sup>†</sup> 遠 藤 州<sup>††</sup>

近年地理情報システムの利用が拡大し、その中核となるデジタル地図データ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、ベクトル型地図データに対して、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。ベクトル型地図は、建物の外郭、等高線、道路などの地物を2次元空間の頂点とその集合である折れ線や多角形で表現する地図である。本論文の電子透かし手法は、与えられた矩形の地図データを多数の小領域に分割し、その各々の小領域に含まれる頂点を移動してその座標の平均値を変化させて透かしを埋め込む。本手法の電子透かしは頂点座標値への乱数値の重畳、頂点の追加や削除、頂点の平行移動や回転、切り取り、その他の妨害に対してある程度の頑強性を持つ。

## Digital Watermarking of Vector Digital Maps

HIRO UEDA,<sup>†</sup> RYUTAROU OHBUCHI<sup>†</sup> and SHU ENDO<sup>††</sup>

Widespread use of geographical information systems prompted the investigations into protecting intellectual properties of digital maps. This paper proposes a digital watermarking algorithm that aims to protect intellectual properties of vector digital maps. A vector digital map represents geographical objects, such as buildings, contour lines, and streets using such (two-dimensional) geometrical primitives as vertices, poly-lines, and polygons. Our algorithm embeds a watermark bit by minutely displacing an average coordinate value of a group of vertices in a rectangular area. The rectangle is created by subdividing the map into rectangular sub-areas based on the density of geometrical primitives. Watermarks produced by this method are resilient, although not totally immune, against additive random noise, topology alterations due to addition and removal of vertices, translation and rotation of vertices, cropping, and other attacks.

### 1. はじめに

近年、デジタル電子地図が急速に普及した。代表的なものは地理情報システム (GIS: Geographic Information Systems) への応用である。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、災害予測、環境保護、課税などの場面にお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、ウェブ上の電子地図サービスなどでデジタル電子地図は広く用いられている。

2次元の (平面状の) 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、等高線といった地物を、頂点およ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合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ない。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。

電子地図データは、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1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、著作権情報などを埋め込み、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。

<sup>†</sup> 山梨大学工学部コンピュータ・メディア工学科  
Computer Science Department, Yamanashi University  
<sup>††</sup> 日本アイ・ビー・エム株式会社 GIS 事業推進部  
IBM Japan

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<sup>4),8),22)</sup>．

本論文では，ベクトル型電子地図を対象とする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．本論文の電子透かし手法を分類すると，妨害に耐えて残ることをめざす頑強な透かし (robust watermark) で，かつ，透かし取り出しの際に透かしの入ったデータと透かしを入れる前の元データの両方を必要とする秘密透かし (informed-detection watermark, または private watermark) である．

本手法は，地図においては向き・位置の正規化が可能なることを利用し，地図を 1 次元の数値列に変換してから透かしの埋め込み・取り出しを行う．1 次元の数値列を生成するため，地図に領域分割をほどこして矩形の小領域を生成し，その小領域内に含まれる頂点の集合の座標の平均を求め，これを埋め込み対象の数値とする．1 次元の数値列を作るには，矩形集合を木の深さ優先探索などで順序付けする．ついで，各矩形内の頂点を移動することでその頂点座標値の平均値を変更し，透かしの埋め込み．透かしの取り出しは，透かしの入った地図と元の地図の位置・向き・大きさを正規化した後，矩形領域を再現し，それぞれの矩形内の頂点座標の平均を比較することで行う．

少領域内の頂点座標を平均すること，および同じ情報を同一地図内に繰り返して埋め込むことで，頂点座標値へのノイズの重畳，切り取り，その他の妨害にある程度の耐性を持たせることができた．

以下，次節で電子地図への透かしに関連するこれまでの研究を紹介する．ついで 2 章に本手法の詳細を，3 章に評価実験とその結果を述べる．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．

### 1.1 関連研究

ラスター型電子地図は，地図としての通常の利用で多用される拡大・縮小・回転などの幾何変換で品質が大きく低下し，不正な再利用が困難である．実際，ウェブ上の地図サービスなどでは，サーバ上にはベクトル型電子地図を持つが，ブラウザからの要求に基づいてクライアントで表示する場合にはラスター型電子地図を用いている．つまり，ベクトル型電子地図を低・中画質のラスター型地図に変換し配信することで，不正な再利用を抑制する．また，ラスター型電子地図は 2 次元画像であり，何らかの透かし処理が必要な場合には，2 次元画像を対象とする既存の電子透かし技術が応用できる．

ベクトル型電子地図は幾何変換を加えても品質が低下しない利点を持ち，不正な再利用をされる危険性が

高い．これに対抗するため，ベクトル型電子地図に電子透かしを付加し，その知的所有権を守ることが考えられるが，その研究は筆者らの知る限りまだ比較的少ない<sup>18)~21)</sup>．

ベクトル型電子地図を対象とする電子透かし手法には，頂点移動によるものと，頂点挿入により折れ線などの幾何プリミティブの頂点接続性 (位相) を変更するものの 2 種類が存在する．

頂点移動による電子透かし手法としては，頂点単体を直接移動して透かしの埋め込み手法<sup>18),21)</sup>，領域分割をほどこしその小領域に含まれる頂点群を移動して透かしの埋め込み手法<sup>21)</sup>がある．いずれも詳細は不明だが，坂本らの手法は頂点座標値にノイズを重畳させる妨害に対して弱いと推測される．

変換領域の手法として，地図を 2 次元格子状に領域分割した後に，各領域に含まれる地物の多角形の面積の平均を数値としてとらえ，その 2 次元の数値配列をウェーブレット変換した領域で透かしの埋め込み手法<sup>19)</sup>がある．画像に対する変換領域での電子透かしと同様，この手法は高い妨害耐性を持つが，適用上の弱点も持つ．北村らの手法では，ウェーブレット変換，透かし情報による係数の変調，ウェーブレット逆変換の結果，頂点の存在しない矩形にも非ゼロの値を与える必要が出てくる．頂点がなければ値を持たせることができないため，北村らの手法ではこれを「差分地図」として保存し，取り出しに利用する．しかし，特に地物の疎な地図の場合に差分地図に多くの透かし情報が含まれることになり「透かしのない地図から透かしが取り出せる」危険がある．

頂点間の接続性を変更する手法としては，多角形や折れ線といった地物に頂点を挿入する手法<sup>18),20)</sup>が存在する．しかし，見かけをまったく，あるいはほとんど変更せずに頂点を挿入・削除することは妨害を加える側も可能であり，したがって目的によっては妨害耐性が十分でない．また，道路地図など，頂点の接続性が本質的な情報を持ち，変更が許されない場合もある．

このほか，2 次元のベクトル型電子地図に類似した，いわゆる構造データを対象として透かしの埋め込み研究として，3 次元形状を定義するポリゴンメッシュを対象とする電子透かしの研究がある<sup>1),2),7),9)~12),15)~17)</sup>．

2 次元ベクトル地図と 3 次元ポリゴンメッシュには類似する点も多い．いずれも頂点座標と頂点接続性により定義され，サンプル点 (頂点) の間の接続性もサンプル点間の距離 (サンプル間隔) も不規則である (2 次元画像では，隣接する画素が暗黙のうちに規定されており，かつそのサンプル間隔も一定である)．また，

2次元画像のサンプル数(画素数)は,2次元電子地図や3次元モデルのサンプル数(頂点数)に比べ,はるかに多い。

しかし,3次元ポリゴンメッシュと2次元のベクトル型電子地図では異なる点もある。たとえば,電子地図の場合「究極」の元データである実世界が存在し,また東西南北の向きが自然に定義されている。したがって,ある地図に回転などの幾何変換が加えられてもその変換を推定して除去することは比較的容易である。これに対し3次元モデルでは,元モデルに拡大・回転などの変形したのももまた妥当な「元」3次元モデルであるなど,モデルの位置・向きの正規化や埋め込み情報の順序付けなどが大変困難である<sup>9),10)</sup>。

3次元ポリゴンメッシュを対象とする電子透かし手法の多くは(2次元の)ベクトル型電子地図に適用できる可能性があるが,今回我々は,絶対的参照物が存在し,向きや大きさなどの正規化が容易であるという地図の特性を利用した手法を提案する。

## 2. 頂点群移動による電子透かし手法

ベクトル型地図データを対象とした我々の電子透かし手法の概略は以下ようになる。

透かしの埋め込むには,まず,全国を均等な矩形に分割した地図の1枚であるセルを複数の矩形に分割する。このとき,各矩形に地物を表現する頂点がある一定個数以上含まれるように,適応的に矩形分割する。それぞれの矩形に含まれる複数の地物の複数の頂点を同じ方向に同じ距離だけ平行移動し,矩形あたりの頂点座標値の平均を変更することで,1矩形あたり1ピットの情報を埋め込む。複数ピットよりなる透かし情報を埋め込むには複数の矩形の間に線形順序を導入する必要があるが,これには,矩形分割の手法によって,ラスタ操作の順序や,木の深さ優先探索による順序などを用いる。それぞれの矩形内にある複数の頂点の座標値を平均することで,頂点座標値への乱数値の重畳,頂点座標の間引きや追加,その他の妨害に対して耐性を持たせることができる。

透かしの取り出しは,保存しておいた(透かしの入っていない)元地図(以後,これを参照地図と呼ぶ)と,透かしが施され,さらに妨害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,元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。透かし地図には回転,平行移動,切り取り,拡大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ったのとまったく同じ矩形分割を生成し,この矩形分割を透かし地図にもあてはめる。それぞれの矩形の頂点座標の平均値を参照地図と透かし地図の間で比較して取り出したピットを埋め込みに用いたと同様に順序付けすると,複数ピットからなる透かし情報が取り出される。

### 2.1 透かしの埋め込み

透かしの埋め込みは,元地図の矩形領域への分割で始まる。このとき,(1)矩形あたり $d$ 頂点以上が含まれ,(2)矩形あたりの頂点数のばらつきができるだけ小さいように,矩形分割を行う必要がある。矩形あたりの頂点数 $d$ は拮抗する要件を考慮して決定する必要がある。頂点数 $d$ が増えると,ノイズの平均化効果により,単一の矩形に埋め込まれた透かしピットの妨害耐性は高くなる。しかし,地図あたりの矩形数が減り,したがって地図あたりの埋め込み情報量が減る。さらに,矩形数が減ると,後述する反復埋め込みの反復回数も減少し,ノイズや切り取りなどの妨害に対する耐性が低下する。

我々は,(1)一様矩形分割法,(2)4分木分割法,(3)適応的統合法,の3つを実装し比較した。これらはそれぞれ以下のようなものである。

- (1) 一様矩形分割法 : 一様矩形分割法は,地図1枚(1セル)を均等な形の矩形に分割する。このとき,矩形ごとの頂点数の偏りについて考慮しない。
- (2) 4分木分割法 : 4分木分割法は領域の4分割を試み,分割後のすべての矩形内に含まれる頂点数 $n$ が規定値以上もしくは0であった場合はその分割を受け入れる。1つでも頂点数が0以上規定値以下となる矩形が存在する場合,矩形を統合してその分割を終了する。分割前に矩形に頂点が存在しない場合,分割を終了する。
- (3) 適応的統合法 : 適応的統合法は4分木による領域分割を元としている。領域の4分割を試み,分割後のすべての矩形内に含まれる頂点数 $n$ が規定値以上もしくは0であった場合はその分割を受け入れる。しかし,分割した4つの矩形のうち1つでも規定値以下となる矩形が存在する場合には,その矩形を隣接する矩形と統合し統合後の矩形の頂点数が規定値を超えるようにする。もし2つ以上の隣接する矩形が統合の候補になりうる場合,



一様矩形分割(8×8)

領域分割数:64

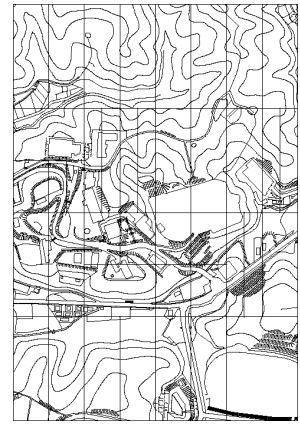
使用矩形数:19



4分木分割

領域分割数:19

使用矩形数:18



適応的統合分割

領域分割数:40

使用矩形数:38

図1 分割手法の違いによる分割数の比較

Fig.1 Area subdivision methods and the numbers of usable sub-areas.

より頂点数が少ない隣接矩形と統合する．この手続きを再帰的に繰り返すことで領域の分割が行われる．規定値以下の矩形が存在しかつ統合できる矩形が存在しない場合、もしくは分割する前の矩形に頂点が存在しない場合分割を終了する．

例として、上記の3種類の領域分割を同一の地図データに行ったときの比較図を図1に示す．

一様矩形分割法の場合、西から東、次いで北から南、の順で矩形のラスタ走査を行い、線形順序を導入する．また、4分木分割法と適応統合法で生成された矩形に対しては、分割によってできた矩形の木を深さ優先探索し、線形順序を導入する．

各矩形に含まれる地物(複数)をなす頂点の集合を対象とし、その座標値の平均値を計算してその矩形の数値とする．この数値を与えられた透かし情報のビット列に基づいて変調することで1ビットの透かしを埋め込む．すでに矩形群には線形順序がついているので、複数ビットからなる透かし情報を埋め込むことができる．

このとき、変更した座標値が矩形外となるような頂点は座標値を変更しないこととする．あらかじめ指定した一定数以上の頂点座標値を変更できない場合、その矩形を透かしの埋め込みに使用しない．

埋め込みビット列の  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 番目のビット  $a_j$  (値は  $\{0, 1\}$  をとる) 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．

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

$b_i$  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．

埋め込む情報の反復は、以下の2種類手法で行った．

- (1) シンボル反復法 : 透かし情報を各シンボル(1ビットの情報)ごとに  $c$  回反復し、順序付けした埋め込みを行う手法．
- (2) メッセージ反復法 : 透かし情報全体を繰り返し埋め込む手法．

の2種類を繰返し手法として用いている．シンボル反復法では、1つのシンボルが空間的に隣接した複数の矩形に反復して埋め込まれる．これに対しメッセージ反復法では、1つのシンボルが地図全体に分散して埋め込まれる．後者の手法を用いると、地図の切り取りに耐性のある透かしが得られると期待される．

これらの透かし情報を矩形  $h_i$  に含まれる  $l$  個の頂点  $\nu_{im}$  ( $m = 1, 2, \dots, l$ ) に埋め込む．変更された頂点座標  $\tilde{\nu}_{im}$  は、次のように計算される．

$$\tilde{\nu}_{im} = \nu_{im} + b'_i \cdot p_i \cdot \alpha. \quad (2)$$

$\nu_{im}$  : 変更する前の頂点の座標値．

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

$\alpha$  : 変調振幅(頂点の移動距離)．

この式は地図の頂点  $\nu_{im}$  の2成分( $x, y$ )の両方に対して個別に適用されるので、頂点は埋め込むビットが1なら北東( $x, y$ とも正の変位)に、0なら南

西 ( $x, y$  とともに負の変位) に、同一距離だけ移動する。このとき、変位の結果、ある頂点が矩形  $h_i$  の範囲外に出てしまう場合、その頂点は移動しない。

擬似乱数系列  $p_i$  は透かし情報を白色雑音かし、埋め込み後も平均値のシフトがないようにしている。 $p_i$  のシード値をどのように扱うのかは透かしの使い方に依存する。たとえば、誰もが透かしを取り出せるようにするには固定にして公開すればよい。また、 $p_i$  のシード値を持たないと透かし情報の取り出しが行えないことを利用し、埋め込んだ情報を第三者が取り出すのを阻害する目的に使うこともできる。その場合にはシード値を(共通鍵暗号の)暗号鍵のように扱い、何らかの方法で(たとえば、公開鍵暗号系を応用して)正統な受け取り手に配送する必要がある。また、使用する擬似乱数系列も(暗号的な意味で)質の良いものが必要となる。

変調振幅  $\alpha$  は経験的に地図の品質に影響が出ない程度の値を選んでいる。国土地理院の規定によれば、1/2500 地形図の図面上での許容誤差は 0.3 mm で、これは実世界で 75 cm に相当する。我々の用いた地図の縮尺は 1/1500、セルの範囲は 750 m  $\times$  500 m で、これを整数座標 7500  $\times$  5000 で表す。したがって整数値で表す座標の最小単位は実空間で 10 cm である。国土地理院の許容誤差より十分小さな振幅、たとえば  $\alpha = 1$  を透かしの変調に用いれば、許容誤差上は問題がない。

## 2.2 透かしの取り出し

透かしの取り出しは、保存しておいた参照地図と、透かし地図とを比較して行う。

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名、建物の所有者あるいは居住者の名前である文字列がふられている。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できる。これらの名前がふ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<sup>3),14)</sup>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)があると、より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で使用したのと同じの方法でまったく同じ矩形分割を生成し、

この矩形分割を透かし地図にもあてはめる。矩形領域が生成されると、以下のようにして、参照地図と透かし地図を比較し、両地図の対応する矩形ペアにおいてその頂点座標の平均値の差を計算し、透かしの 1 ビットを取り出す。取り出した複数ビットを埋め込みに用いたと同様に順序付けすると、(妨害が無視できるとすれば)埋め込んだ透かし情報が取り出される。

式(2)で使用した  $p_i$  と矩形  $h_i$  に含まれる全頂点の座標平均値を使用し、 $q_j$  を求める。このとき、攪乱などを無視できると仮定すると  $q_j$  は式(3)のようになる。

$$q_j = \sum_{i=j \cdot c}^{(j+1) \cdot c - 1} (\bar{v}_i - \bar{v}_i) \cdot p_i \simeq \sum_{i=j \cdot c}^{(j+1) \cdot c - 1} b'_i \cdot \alpha \cdot p_i. \quad (3)$$

$\bar{v}_i$ : 元地図データの矩形  $h_i$  に含まれる頂点座標値の平均。

$\bar{v}_i$ : 透かしを埋め込んだ地図データの矩形  $h_i$  に含まれる頂点座標値の平均。

ただし、 $\bar{v}_i - \bar{v}_i$  を求める際、振幅  $\alpha$  を基準としたしきい値  $t$  を設定する。

$$t = \alpha + \sqrt{\alpha}. \quad (4)$$

このしきい値  $t$  によって、ノイズなどにより頂点が大きく変位したために破壊された透かしシンボル  $b'_i$  を除去する。

頂点座標値へのランダムノイズ重畳などの妨害を無視できるとすると、 $q_j$  は、式(5)のようになる。

$$q_j = c \cdot \alpha \cdot b'_j. \quad (5)$$

式(5)より、反復回数  $c$ 、振幅  $\alpha$  はつね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。

$$a_j = \text{sign}(q_j). \quad (6)$$

すべての矩形から透かしビットを取り出すことにより、埋め込んだ透かし情報を取り出すことができる。

本手法では矩形内に存在する頂点座標値の平均を操作することで透かし情報を埋め込んでいる。しかし、この手法を使用した場合、頂点の追加が行われると矩形内の平均値が変化し透かし情報が破壊されることがある。

そこで、埋め込みに使用した頂点と攪乱のために追加されたと思われる頂点を選別するために元地図の頂点情報を利用する。本透かし手法は秘密透かしであり、地図上のどの頂点が透かし埋め込みに使用されたかが一意に定まる。透かし埋め込みに使用された頂点の位置から一定の半径  $r$  内に存在する頂点を透かし情報の埋め込みに使用した頂点として取り出しに使用する。



元地図 透かし入り地図

図 2 元地図と透かし入りの地図

Fig. 2 Comparison of the original and the watermarked maps.

$$r = r + \sqrt{r}. \tag{7}$$

半径  $r$  の初期値にはしきい値  $t$  を使用する．使用される頂点が元地図の頂点数以上になるまで半径  $r$  を順次拡大する．

### 3. 実験

#### 3.1 埋め込みの可知性

本手法で透かしを埋め込んだ地図(図2)を学生10名に確認してもらった．埋め込みに用いた変調振幅は地図の整数座標値で振幅  $\alpha = 1$  , 実世界で 10cm である．その結果, 透かしを埋め込んで人間が見た限りでは品質の低下を確認できなかった．この電子透かし手法は, 一般のユーザが利用する場合には, 利用目的を損ねない程度の低い可知性を備えているといえる．前述のように, 国土地理院の規定でも実世界で 75 cm 程度の誤差は許容誤差とあるので, この点でも問題はない．

#### 3.2 領域分割手法の比較

##### 3.2.1 領域分割と埋め込みデータ容量

一樣な矩形に分割する一樣分割法, 4分木による分割法, および適応的統合法の3種類の領域分割手法の間で, 埋め込みデータ容量の比較を行った．一樣分割法の場合, セルを  $25 \times 25$  および  $30 \times 30$  の2種類の分割数で均一な矩形に分割した．いずれの領域分割手法の場合も, ある矩形の頂点数が 10 以上なら埋め込みの対象にし, それ以下なら埋め込みには使用しないこととした．3種類の手法(矩形分割パラメータの相違も含めると4種類)の埋め込みデータ容量を, 6種類の性格の違う地図について比較した結果を表1に示す．なお, 地図の縮尺は  $1/1500$  , セルの範囲は

表 1 埋め込みデータ容量の比較(単位: ビット)  
Table 1 Area subdivision methods and their data capacities measured in bits.

|      | 一樣矩形分割法        |                | 4分木 | 適応的統合法 |
|------|----------------|----------------|-----|--------|
|      | $25 \times 25$ | $30 \times 30$ |     |        |
| 地図 A | 553            | 708            | 621 | 936    |
| 地図 B | 513            | 621            | 543 | 828    |
| 地図 C | 485            | 524            | 361 | 707    |
| 地図 D | 376            | 428            | 257 | 591    |
| 地図 E | 351            | 348            | 231 | 456    |
| 地図 F | 185            | 159            | 142 | 304    |

$750 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  で, これを整数座標  $7500 \times 5000$  で表す．したがって座標の最小単位は実空間で 10 cm に対応する．地物の密度(頂点数)は地図 A, 地図 B が密, 地図 C, 地図 D が中, 地図 E, 地図 F が疎となっている．実験に使用した地図を図3に示す．

表1から, すべての地図に対し, 一樣分割法や4分木分割法に比べ, 適応的統合法の埋め込みデータ容量が最も多くなっていることが分かる．データ量が多いということは, 同時に透かし情報の繰返し回数が増やせることを意味し, したがって耐性も高くなるといえる．

##### 3.2.2 領域分割と頑強性

3種類の領域分割手法を用いて埋め込んだ透かしに各種攻撃をほどこしたときの透かしの耐性をみる実験を行った結果を以下に示す．いずれの表の実験も, 透かしの変調振幅  $\alpha = 1$  (実空間で 10 cm) とした．また, ベクトル型地図データは図3に示した6種類の地図を用いた．

表2に示すのは, 反復回数  $c$  を 3 に固定した場合の耐性実験の結果である．埋め込み情報量は, それぞれ, 反復回数  $c$  を 3 とする最大のビット数である．たとえば, 4分木の場合, 地図 A には 207 ビット埋め込めるのに対し, 地図 F には 47 ビット, となる．

表3に示すのは, 埋め込みデータ量を 128 ビットに固定し, 反復回数を最大可能数に変化させた場合の耐性実験の結果である．埋め込み量を 128 ビットとしたので, たとえば 4分木の場合, 地図 A では 4 回, 地図 F では 1 回の繰返しとなる．表3では, データ容量の大きい領域分割手法ほど, 反復回数  $c$  が大きくなり, したがって攻撃に対する耐性が増すと期待される．

いずれの表も, 表中の数値は, ビットエラー率を表している．ビットエラー率の算出方法は, 取り出しに失敗したビット数を調べ, それを埋め込みビット数で割った値を 6 種類の地図について平均したものである．

加えた攻撃の種類は,

- 平行移動: すべての頂点座標値を同じ値だけ移動

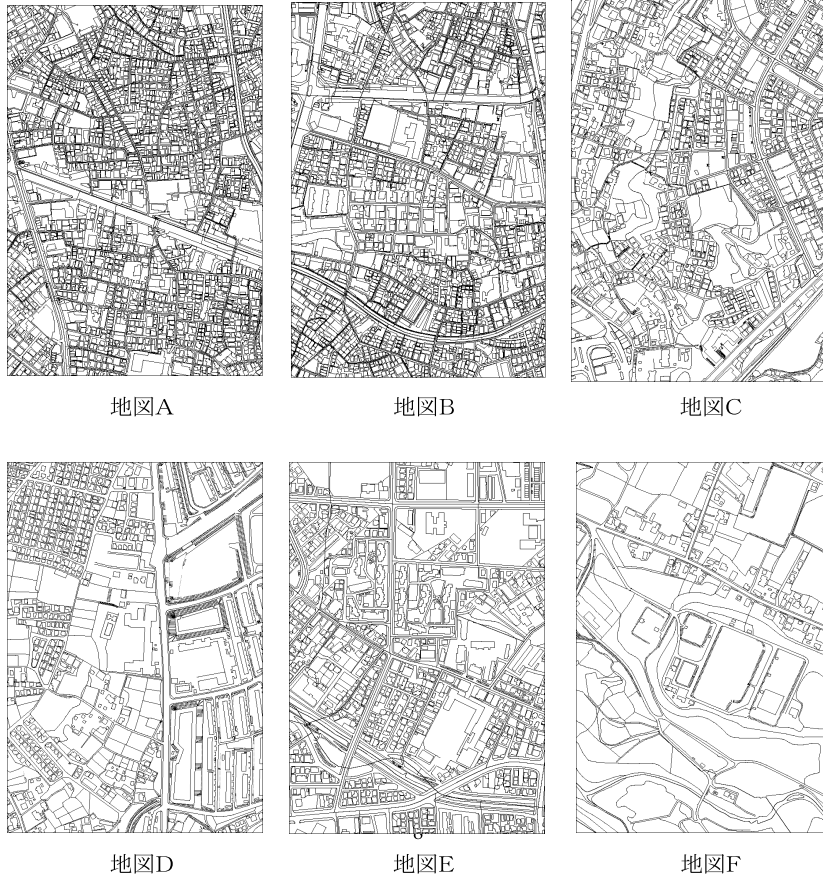


図3 実験に使用した地図データ  
Fig. 3 Maps used for the experiments.

表2 領域分割手法と透かしの頑強性. 本実験では, 反復回数  $c = 3$  で固定し, 用いた地図と領域分割手法の組合せで許されるデータ容量に埋め込める最大長のメッセージを埋め込んだ.

Table 2 Attack resistance of the watermark using three subdivision methods. The repetition rate was fixed at  $c = 3$  and the maximum message length possible was chosen given the data capacity determined by the map and area subdivision method combination.

| 攪乱の種類                   | 一様矩形分割法 |         | 4分木   | 適応的<br>統合法 |
|-------------------------|---------|---------|-------|------------|
|                         | 25 × 25 | 30 × 30 |       |            |
| 平行移動                    | 0.0%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| 拡大                      | 0.0%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| 縮小                      | 3.0%    | 4.5%    | 4.9%  | 2.7%       |
| 回転                      | 2.9%    | 2.6%    | 2.2%  | 1.1%       |
| 順序入れ替え                  | 0.0%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| 頂点追加                    | 0.1%    | 0.1%    | 0.0%  | 0.1%       |
| 頂点削除                    | 0.3%    | 0.4%    | 0.2%  | 0.3%       |
| ランダムノイズ重畳<br>(振幅 10 cm) | 0.0%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| ランダムノイズ重畳<br>(振幅 50 cm) | 19.6%   | 17.5%   | 20.6% | 18.6%      |

表3 領域分割手法と透かしの頑強性. 本実験では埋め込み量を 128 ビットに固定し, 用いた地図と領域分割手法の組合せで許される(最大)データ容量で可能な最大の反復回数を用いた.

Table 3 Attack resistance of the watermark using three subdivision methods. The embedded message size is fixed at 128 bits, and the repetition rates is the maximum possible determined by the map and area subdivision method used.

| 攪乱の種類                   | 一様矩形分割法 |         | 4分木   | 適応的<br>統合法 |
|-------------------------|---------|---------|-------|------------|
|                         | 25 × 25 | 30 × 30 |       |            |
| 平行移動                    | 0.0%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| 拡大                      | 0.1%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| 縮小                      | 7.2%    | 7.4%    | 11.2% | 2.6%       |
| 回転                      | 5.9%    | 4.4%    | 3.8%  | 0.8%       |
| 順序入れ替え                  | 0.1%    | 0.0%    | 0.0%  | 0.0%       |
| 頂点追加                    | 0.7%    | 0.9%    | 1.7%  | 0.0%       |
| 頂点削除                    | 0.9%    | 1.6%    | 1.8%  | 0.0%       |
| ランダムノイズ重畳<br>(振幅 10 cm) | 0.1%    | 0.0%    | 0.7%  | 0.0%       |
| ランダムノイズ重畳<br>(振幅 50 cm) | 25.9%   | 21.7%   | 29.6% | 13.2%      |

する、

- 拡大：すべての頂点座標値を一樣な倍率で拡大する、
- 縮小：すべての頂点座標値を一樣な倍率で移動する。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：すべての頂点座標値を一樣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、地図の見た目の変化が小さいように、( ほぼ ) 直線上に新たな頂点を追加する、
- 頂点削除：表示した際、地図の見た目に変化が少なくなるように ( ほぼ ) 直線上に存在する頂点を削除する、
- ランダムノイズ重畳：頂点座標値にランダムノイズを加え頂点座標値を変化させる、

の 8 種類である。

攻撃に用いたランダムノイズの振幅は 2 種類、10 cm と 50 cm を設定した ( 振幅の値は実空間におけるものである )。地物の順序の入れ替えとは、たとえば、地図ファイル中で建物 A が建物 B より先に現れていたものを、建物 B が A より先に現れるように出現順序を変更することを指す。ベクトル型地図データファイルでは、1 つ地物が 1 つの実体として ( たとえば、頂点座標の列と頂点接続性情報の 1 かたまり ) 記述され、多数の地物を表す多数の実体がファイル中で列挙されている。その列挙の順序の変更は多くの場合、地図の意味や見かけに影響を与えない。しかし、透かし的手法によってはその順序の変更によって透かしが破壊されることもありうる。

表 2 より、いずれの領域分割を行った場合でも、各種攻撃に対するある程度の耐性があることが分かる。また、表 3 から、埋め込みデータ容量が同等の場合、データ容量が高く、したがって反復回数 ( 拡散率  $c$  ) を多くとることのできる適応的統合法が最も攻撃耐性が高いことが分かる。また、適応的統合法を除き、表 2 より表 3 の誤り率が高い。これは、128 ビットに埋め込み量を固定した表 3 の実験では、埋め込み反復回数が表 2 のそれより低下する場合が多かったためである。たとえば、4 分木による分割の場合、地図 A では反復回数  $c = 4$  となるが、地図 E や地図 F では  $c = 1$  となる。つまり、地図 E や地図 F の場合、反復回数が表 2 の  $c = 3$  から表 3 の  $c = 1$  に低下しており、結果として攻撃に対する耐性が悪化した。



元地図

ランダムノイズ重畳

図 4 ランダムノイズ重畳による品質の低下 ( ランダムノイズの振幅 50 cm )。矩形的地物が歪むなど、明確な品質低下が認められる

Fig. 4 Quality degradation of the map due to the random noise of the amplitude 50 cm added to the vertex coordinate. Some of the building outlines are noticeably distorted.

表 4 埋め込み反復法と耐性

Table 4 Repetition methods and their resistance against attacks.

| 攪乱の種類                     | シンボル反復法 | メッセージ反復法 |
|---------------------------|---------|----------|
| 平行移動                      | 0.0%    | 0.0%     |
| 拡大                        | 0.0%    | 0.0%     |
| 縮小                        | 2.6%    | 0.7%     |
| 回転                        | 0.8%    | 0.0%     |
| 順序入れ替え                    | 0.0%    | 0.0%     |
| 頂点追加                      | 0.0%    | 0.0%     |
| 頂点削除                      | 0.0%    | 0.0%     |
| ランダムノイズ重畳<br>( 振幅 10 cm ) | 0.0%    | 0.0%     |
| ランダムノイズ重畳<br>( 振幅 50 cm ) | 13.2%   | 7.4%     |

表 2 から、ランダムノイズ重畳 ( 振幅 50 cm ) ではいずれの領域分割手法でも 20% 程度透かしが破壊されている。この結果はさほど良くないようにもみえる。しかし、透かしの破壊のために 50 cm のランダムノイズを載せた地図データは図 4 より分かるように、明らかに品質が低下した。

### 3.3 透かし情報反復手法と頑強性

領域分割手法を適応適統合法に固定し、透かし埋め込み時の埋め込み情報を反復する 2 種類の手法、シンボル反復法とメッセージ反復法を比較した。攻撃として、3.2.2 項で用いた 8 種類に加え、地図の切り取りを加えた合計 9 種類を用いた。以下本節で述べる実験では変調振幅  $\alpha = 1$  とした。埋め込み量は固定し、その条件下で可能な最大の埋め込み反復回数  $c$  を用いた。

表 4 は、3.2.2 項で用いた 8 種類の攻撃 ( 切り取り以外 ) を加えたときの耐性をみる実験の結果である。この実験に用いた地図データは 3.2.2 項と同じで、縮尺 1/1500、セルの範囲 750 × 500 を整数座標値 7500 × 5000 で表した、図 2 に示す 6 種類の地図であ





図 5 地図データに行った切り取りの種類

Fig. 5 Eight cropping patterns applied to the map in the experiment.

る．表 4 中の数値は，ビットエラー率をパーセントで表したもので，これは取り出しに失敗したビット数を調べ，それを埋め込みビット数で割った値である．

表 4 の結果を見ると，シンボル反復法とメッセージ反復法の双方がある程度の耐性を実現しているが，縮小や回転（いずれも切捨てによりノイズが加えられるため，その効果はランダムノイズ重畳に類似する）や振幅 50 cm のランダムノイズ重畳の場合，メッセージ反復法の耐性が有意に高い．

表 5 の結果は，同じ 6 種類の地図に透かしを埋め込み，これらそれぞれを図 5 に示す 8 種類の部分を残して切り取った後，透かしを取り出そうとしたエラー率である．エラー率はそれぞれの切り取り方で 6 種類の地図のエラー率を平均したものである．

表 5 の結果を見ると，シンボル反復法を用いた場合よりメッセージ反復法を用いた場合のほうが切り取りに対する耐性が高い．前述のように，シンボル反復法

表 5 埋め込み反復法と切り取りに対する耐性

Table 5 Repetition methods and their resistance against cropping.

| 切り取りの種類 | シンボル反復法 | メッセージ反復法 |
|---------|---------|----------|
| 切り取り 1  | 41.7%   | 1.2%     |
| 切り取り 2  | 43.6%   | 1.4%     |
| 切り取り 3  | 71.2%   | 5.9%     |
| 切り取り 4  | 82.7%   | 5.9%     |
| 切り取り 5  | 68.5%   | 16.0%    |
| 切り取り 6  | 70.7%   | 14.6%    |
| 切り取り 7  | 79.8%   | 9.3%     |
| 切り取り 8  | 91.5%   | 35.6%    |

では 1 シンボルが地図上の空間的近傍に埋め込まれるため，地図の切り取りにより反復した埋め込みすべてが破壊される可能性が高い．これに対し，メッセージ反復法では 1 シンボルによる変更が地図全体に分散する．したがって，切り取り付近で埋め込み情報の破壊が生じてもそれ以外の部分の埋め込みが残り，全体と

して情報が残るためである。

全体として、今回の実験の範囲では、メッセージ反復法のほうが優れていることが分かる。

#### 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。本手法は、まず、ベクトル型地図データをそれに含まれる地物の密度に適応的に複数の矩形に分割する。次に、分割に用いた木を深さ優先探索するなどして矩形群に線形順序を付ける。透かし情報 1 ビットに基づき、ある矩形内に含まれる多数の頂点を平行移動し、その座標の平均値を変更することで透かしを埋め込んだ。透かしの取り出しは、透かしの入っていない元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。

提案手法では 4 分木を改良した適応適統合法を領域分割に用いることで、地物の粗密の変化が大きな地図でも比較的高い埋め込み情報密度を得ることができた。また、提案手法はランダムノイズ重畳、頂点や地物の付加や間引き、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。ただし、本論文で行った本手法と他手法との比較は定性的なもので、他手法に対する本手法の優位性が実験的・定量的に明らかになったわけではない。今後、他手法を実装するなどして定量的比較を行う必要がある。

ベクトル型電子地図への透かし埋め込みの研究は始まったばかりである。今後、本手法を改善するとともに、取り出しに元地図が不要で使い方が幅広い公開透かしの手法など、新たな手法を開発する必要がある。

また、本分野での研究を推進するためには、複数のベクトル型 2 次元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。たとえば、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だろう。

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いただいた。特に、実験に必要なプログラムを提供していただき、またディスカッションに参加していただいた東京大学の増田宏助教授、および北海道大学の金井理助教授に感謝する。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。

#### 参考文献

- 1) Benedens, O.: Geometry-Based Watermarking of 3D Models, *IEEE CG&A*, pp.46–55 (Jan./Feb. 1999).
- 2) Benedens, O. and Busch, C.: Towards Blind Detection of Robust Watermarks in Polygonal Models, *Proc. EUROGRAPHICS 2000 (Computer Graphics Forum)*, Vol.19, No.3 (2000).
- 3) Cox, G.S. and DeJager, G.: A survey of point pattern matching techniques and a new approach to point pattern recognition, *Proc. South African Symposium on Communications and Signal Processing*, pp.243–248 (1993).
- 4) Cox, I.J., Miller, M.L. and Bloom, J.A.: *DIGITAL WATERMARKING*, Morgan Kaufmann Publishers (2001).
- 5) Hartung, F., Eisert, P. and Girod, B.: Digital Watermarking of MPEG-4 Facial Animation Parameters, *Computer and Graphics*, Vol.22, No.4, pp.425–435, Elsevier (1998).
- 6) Johnson, N.F., Duric, Z. and Jajodia, S.: *Information Hiding: Steganography and Watermarking—Attacks and Countermeasures*, Kluwer Academic Publishers (2000).
- 7) Kanai, S., Date, H. and Kishinami, T.: Digital Watermarking for 3D Polygons using Multiresolution Wavelet Decomposition, *Proc. 6th IFIP WG 5.2 GEO-6*, Tokyo, Japan, pp.296–307 (Dec. 1998).  
<http://minf.coin.eng.hokudai.ac.jp/members/kanai/wm1-geo6.pdf>
- 8) Katzenbeisser, S. and Petitcolas, F.A.P.: *Digital Watermarking*, Artech House, London (2000).
- 9) Ohbuchi, R., Masuda, H. and Aono, M.: Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models, *Proc. ACM Multimedia '97*, Seattle, Washington, USA, pp.261–272 (Nov. 1997).
- 10) Ohbuchi, R., Masuda, H. and Aono, M.: Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modifications, *IEEE JSAC*, pp.551–560 (May 1998).
- 11) Ohbuchi, R., Takahashi, S., Miyazawa, T. and Mukaiyama, A.: Watermarking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain, *Proc. Graphics Interface 2001*, Ontario, Canada, pp.9–17 (June 2001).
- 12) Praun, E., Hoppe, H. and Finkelstein, A.: Robust Mesh Watermarking, *Proc. SIGGRAPH '99*, pp.49–56 (Aug. 1999).
- 13) Press, W.H., et al.: *Numerical Recipes in C—*

*The Art of Scientific Programming*, 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK (1992).

- 14) Rothe, I., Suesse, H. and Voss, K.: The method of normalization to determine invariants, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.18, No.4, pp.366-377 (1996).
- 15) Wagner, M.G.: Robust Watermarking of Polygonal Meshes, *Proc. Geometric Modeling & Processing 2000*, April 10-12, Hong Kong, pp.201-208 (2000).
- 16) Yeo, B-L. and Yeung, M.M.: Watermarking 3D Objects for Verification, *IEEE CG&A*, pp.36-45 (Jan./Feb. 1999).
- 17) Yin, K., Pan, Z., Shi, J. and Zhang, D.: Robust mesh watermarking based on multiresolution processing, *Computers & Graphics*, Vol.25, pp.409-420 (2001).
- 18) 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).
- 19) 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, Vol.9, pp.417-421 (2000).
- 20) 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).
- 21) 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).
- 22) 松井甲子雄: 電子透かしの基礎, 森北出版 (1998).

(平成 13 年 11 月 30 日受付)

(平成 14 年 6 月 4 日採録)



植田 寛郎

2001 年山梨大学工学部電子情報学科卒業。工学学士。2002 年現在, 山梨大学大学院工学研究科に在籍中。ベクトル型地図データへの電子透かしに関する研究を行う。



大淵竜太郎 (正会員)

1981 年上智大学理工学部電気電子工学科卒業。1983 年電気通信大学大学院計算機科学科修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム (株) 入社。

1994 年 University of North Carolina at Chapel Hill Computer Science Department より Ph.D. 取得。同年より日本アイ・ピー・エム (株) 東京基礎研究所勤務。1999 年より山梨大学工学部コンピュータ・メディア工学科助教授。3 次元グラフィクス, 形状モデリング, 拡張現実システム等の研究を行う。最近は 3 次元ポリゴンメッシュを対象とした電子透かしや形状モーフィング, 形状類似検索等に興味を持つ。ACM, IEEE, 日本ソフトウェア科学会, 画像電子学会各会員。



遠藤 州

1976 年東京大学理学部地理学科卒業。1979 年筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修了。1976 年 (株) オオバ入社。環境・防災関係の調査・解析業務に従事。1989 年日本アイ・ピー・エム (株) 入社。地理情報システム, 防災情報システム等の開発・コンサルティング業務に従事。著書には「図解リモートセンシングノート」(日本リモートセンシング研究会・共著)、「空間情報技術入門」(国土空間データ基盤推進協議会・共著)、「地理情報科学用語集」(地理情報システム学会用語教育分科会・共著)がある。日本地理学会, 日本写真測量学会, 地理情報システム学会各会員。