

ネットワーク型 Active Shape Models による道路地図の位置精度の向上

上 瀧 剛[†] 内 村 圭 一[†] 胡 振 程^{††}

本論文では、与えた形状を保ったまま変形可能な Active Shape Models (以下, ASM) を用いて、既存の道路地図データを航空画像にマッチングする方法を提案する。さらに, ASM をネットワーク状に拡張することで、各道路が隣接する道路に影響されながら、少しずつ変形できるネットワーク型 ASM を提案する。この方法により、道路間のつながりを保ったまま、道路と交差点位置が同時に更新できることを示す。実際に、提案システムを用いて航空画像と縮尺 1/25,000 の道路地図に対して実験を行った結果、提案手法は道路地図を航空画像上の道路に非常によく一致させることができた。また、定量的な評価を縮尺 1/2,500 の道路地図との比較により行った結果、約 5~10 m の RMS 誤差を持つ既存の縮尺 1/25,000 の数値地図を約 2~3 m の RMS 誤差まで低減させることができた。

Refinishing Positions of Road Map Using Network Active Shape Models

GO KOUTAKI,[†] KEIICHI UCHIMURA[†] and HU ZHENCHENG^{††}

In this paper, we propose to match an existing road map to an aerial image using active shape models (ASM) that is able to deform itself preserving a given shape. Furthermore, we extend the ASM into the network ASM in order to deal with the network structure. The network ASM is able to deform the roads gradually with influenced by the neighboring roads. It allows to update the positions of the roads and the road intersections globally preserving the connections of the road network. Experimental results using the existing 1/25,000 road maps and aerial images showed that the proposed method could match the existing road maps correctly into the roads in the aerial images. A quantitative evaluation for the results was provided by comparing the existing 1/2,500 scale digital maps and the proposed method could reduce the RMS errors of the existing 1/25,000 road maps about 5~10 m into about 2~3 m.

1. ま え が き

高度交通システムや地理情報システムにおいてデジタル道路地図は必要不可欠な基礎要素である。身近なものでは、カーナビゲーションやマーケティングおよび都市計画に使われている。特に近年、高精度な GPS やオルソ航空画像と、デジタル地図データとあわせて用いるサービスが多くなってきた。わが国の主要な都市部を除く多くの地域のデジタル地図は、縮尺 1/25,000 の地図をもとに作成されているが、これは最悪で標準偏差 17.5 m の誤差を含んでおり、高精度な GPS やオルソ航空画像を併用するための十分

な位置精度を持っていない。たとえば、航空写真と道路地図を重ね合わせると、大きくずれてしまうという問題が生じる。

このため、既存の地図情報を航空画像と一致させて位置補正を図る研究が行われてきた。なかでも Snakes¹⁾ モデルは、道路輪郭モデルとして数多く用いられている^{2)~6)}。Snakes の初期輪郭線をオペレータが与え道路を抽出する方法^{2)~4)} や、Snakes の初期輪郭線を既存の数値地図により与えることで、既存の地図を自動的に更新する方法⁵⁾ などがある。また、Snakes の輪郭線を B スプラインで表現した B-Snakes⁴⁾ は、その実装の容易さから航空画像からの道路抽出手法としてよく用いられている。

ところで、既存の数値地図と、実際の画像中の道路は同じような形状を持つという知見を導入して、数値地図の形状を極力保ったまま Snakes の変形を行う方法が現実的である。その実現方法として、既存の

[†] 熊本大学大学院自然科学研究科

Graduate School of Science and Technology of Kumamoto University

^{††} 熊本大学工学部

Faculty of Engineering of Kumamoto University

数値地図と Snakes の形状の差異を定量的に測る評価関数をエネルギー関数に組み込むことが考えられる。Bader⁶⁾ は、数値地図により与えられた初期輪郭線の形状を保つように、初期輪郭線と抽出輪郭との差分のノルムをエネルギー関数に組み込み道路の変形を行っている。しかし、この方法では初期輪郭線の形状を保つように拘束パラメータを大きくすると抽出輪郭が初期輪郭線位置から動かなくなるという問題が生じる。なぜならば、輪郭全体の単純な平行移動も大きく制約を受けるからである。

一方で、B-Snakes をさらに改良した Active Shape Models (以下、ASM)^{7),8)} は、あらかじめ用意した形状テンプレートと抽出輪郭線との、平行移動や回転に不変な誤差関数を導入している。具体的には、形状テンプレートを抽出輪郭線にアフィン変換を用いてあてはめた後に、抽出輪郭との二乗誤差を測っている。抽出輪郭が形状テンプレートを単純にアフィン変換して得られる場合には、この誤差値はゼロになり、形状テンプレートのアフィン変換に加えて歪みが加わった場合には、この誤差値は歪みの分だけ大きくなるため、この誤差関数は形状テンプレートとの形状の差異を定量的に測っていると考えることができる。つまり、形状テンプレートとの形状を極力保った変形とは、この誤差値が小さな輪郭線を求めることとなる。ASM は、先ほどの Bader の手法のように平行移動による制約は受けずに、形状テンプレートの形状を保ったまま変形を行うことができる。ASM はこれまで主に、顔認識や動物体の追跡に用いられていたが、航空画像解析に用いた応用例はなかった。そこで、本論文では、ASM を用いて縮尺 1/25,000 の数値地図を航空画像にマッチングすることにより、数値地図の位置精度の向上を図る方法を提案する。この場合、ASM に必要な形状テンプレートと初期輪郭線を既存の数値地図から自動的に作成することが可能である。

しかし、単純にノード間の道路を 1 本ずつ取り出して更新を行う方法では、交差点箇所では不連続箇所が生じる。この問題は従来手法にもあてはまり⁹⁾、対処法として独立に更新した道路の延長成分から交差点位置を推定する方法がとられていた。しかしながら、この方法では道路が誤って抽出された場合に交差点の推定位置も大きくずれてしまう恐れがある。道路は 1 本ずつ独立に更新するのではなく、隣接する道路および交差点と矛盾がないように、互いに協調しながら更新されるべきである。

この問題を解決するために、本論文ではさらに、道路のネットワーク構造を考慮するために ASM をネッ

トワーク状に拡張する方法を提案する。ASM をネットワーク状に拡張することで、各道路が隣接する道路に影響されながら、少しずつ変形し、道路と交差点位置が同時に更新できることを示す。実際に、航空画像と縮尺 1/25,000 の数値地図を用いて実験を行い、縮尺 1/2,500 の数値地図との比較により精度の検証を行う。

本研究の目的として、縮尺 1/5,000 すなわち RMS 誤差で 3.5 m 程度の位置精度を持つ道路地図を作成することを目指した。これは道路中心位置のずれが 95% の信頼区間で 7 m 以内に収まることを意味する。航空画像の位置精度が十分良いと仮定し、2 車線道路の幅が平均約 10 m であることを考えると、多くの 2 車線以上の道路中心線が航空画像上の道路内に収まることになる。したがって、航空画像や衛星画像上に道路情報を重畳した経路案内では、多くの道路中心線が画像上の道路に重なり、ユーザに分かりやすい指示が可能になると考えられる。なお、対象地域は影や障害物の少ない郊外の住宅街や田舎とする。

2. 道路中心線モデル

2.1 スプラインによる表現

$0 \leq s \leq L$ の範囲でパラメータ化した道路中心線 $\mathbf{r}(s) = (x(s), y(s))^T$ を N 個の局所的な台を持つ区分的な 2 次多項式の基底関数 B_n ($n = 0, 1, \dots, N-1$) により表現する。

$$\mathbf{r}(s) = (x(s), y(s))^T = \sum_{n=0}^{N-1} B_n(s) (q_n^x, q_n^y)^T \quad (1)$$

ここで q_n^x および q_n^y は曲線を制御する重み係数である。基底関数はノットと呼ばれる節点列に従って定義されるが、多重ノットと呼ばれる重複した節点位置を用いることで L 字カーブなどの微分不連続点を含む道路形状を表現することが可能である。図 1 に多重ノット

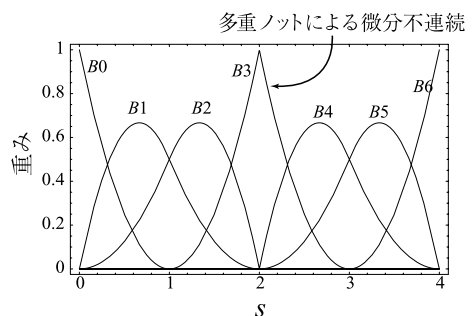


図 1 B スプライン基底関数の例

Fig. 1 Examples of the basis functions of the B-spline.

トを含む B スプライン基底関数列の例を示す。

2.2 数値地図からの変換

具体的に数値地図を B スプライン曲線で近似する方法を述べる。数値道路データは交差点や行き止まりなどの道路ネットワークリンク間を 1 本の道路単位として不等間隔の折線によりデータベースに格納されている。B スプラインは多重ノットを設定することで L 字カーブなどの屈曲点を表現することができる。屈曲点を以下の手順で検出し多重ノットの挿入位置を決定する。

STEP1.1 地図データベースから 1 本の道路を取り出し、細かい間隔 d_1 で等分割し、この座標列を $\{\mathbf{r}_n\}$ とする。

STEP1.2 分割した各点 $\mathbf{r}_n$ で次のように曲線の曲がり具合 κ_n を計算し、閾値を超え、なおかつ κ_n が極大となる点を屈曲点として抽出する。

$$\kappa_n = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2}{|\mathbf{p}_1| \times |\mathbf{p}_2|} \right),$$

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{r}_{n-k} - \mathbf{r}_n,$$

$$\mathbf{p}_2 = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_{n+k}.$$

STEP1.3 始点と終点および屈曲点間を間隔 $d_2 (> d_1)$ で分割する。

続いて、上で求めた点列からなる折線をうまく近似するような B スプライン曲線の制御点列 $\mathbf{Q}^x = (q_1^x, q_2^x, \dots, q_n^x)^T$ および $\mathbf{Q}^y = (q_1^y, q_2^y, \dots, q_n^y)^T$ を求める。任意の曲線 $f(s)$ に対して最小二乗誤差となるように制御点列 $\mathbf{Q}$ を求めるには、

$$\mathbf{Q} = \mathbf{B}^{-1} \frac{1}{L} \int_0^L \mathbf{B}(s) f(s) ds \quad (2)$$

を計算すればよい。ここで、 $\mathbf{B}(s)$ は B スプライン基底関数を並べたベクトル $(B_0(s), B_1(s), \dots, B_{N-1}(s))^T$

で $\mathbf{B}$ は i 行 j 列の要素が $\frac{1}{L} \int_0^L B_{i-1}(s) B_{j-1}(s) ds$

で与えられる正値対称な計量行列である。図 2 に縮尺 1/25,000 の数値地図の道路中心線を上記の処理により等分割化および屈曲点を求め、そのうちの 1 本を B スプラインで近似した例を示す。図 2(b) は多重ノットを挿入しないで数値地図を近似した結果で、図 2(c) は多重ノットを挿入して数値地図を近似した結果である。図の太線は B スプライン近似した道路で、白丸は制御点で四角は検出した屈曲点である。

3. Active Shape Models ^{7),8)}

B スプラインで表現された道路輪郭を画像に一致するように変形させることで道路位置の補正を行う。ASM は与えられた輪郭を、相似変換やアフィン変換

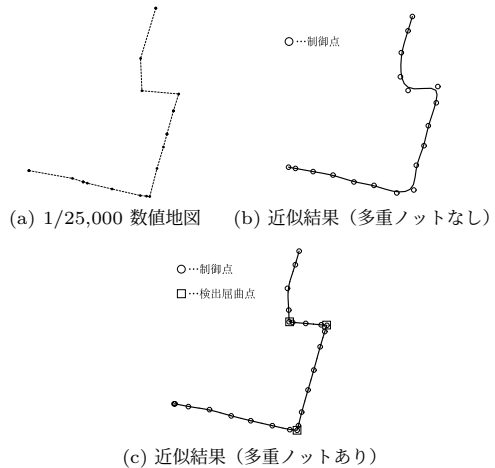


図 2 B スプラインによる数値地図の表現

Fig. 2 Representation of the digital maps as the B-spline.

に加え、局所的に各制御点をそれぞれ自由に変形させることにより、柔軟なマッチングを行うことができる。ただし、本研究で用いる ASM は、物体追跡に要求されるリアルタイム性は必要ではなく、抽出精度を重視するため、1 回の更新で輪郭線を少しずつ変形させる反復法により抽出輪郭線を求めた。また、抽出対象が道路と分かっているため、道路抽出に適した画像処理を施している。

3.1 形状空間とアフィン変形パラメータの推定

S を N 個の制御点がなす B スプライン制御点のベクトル空間とする。 S_s を、ある B スプライン曲線 $\mathbf{Q}_0 \in S$ をアフィン変換した形状だけを集めた部分空間とする。この変形は次のように 6 つのパラメータ $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$ で線形に表現することができる⁸⁾。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{W}\mathbf{X} + \mathbf{Q}_0 \quad (3)$$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_0^x & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_0^y \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_0^y & \mathbf{Q}_0^x & \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{0} = (0, 0, \dots, 0)^T$ および $\mathbf{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$ は N 次元ベクトルで、 $\mathbf{Q}_0^x$ および $\mathbf{Q}_0^y$ はそれぞれ、 $\mathbf{Q}_0$ の x および y 座標値の縦ベクトルである。

画像処理などで得られた抽出輪郭線 $\mathbf{Q}_f \in S$ をテンプレート $\mathbf{Q}_0$ に最小二乗誤差であてはめる問題は、空間 S からその部分空間 S_s へ射影することになる。実際には、数値地図データと航空画像との歪みの差は、上記のアフィン変換のみによって補正できないことが多い。そこで、テンプレートを輪郭線 $\mathbf{Q}_f$ にあてはめる際に、大局的なアフィン変形に加え、局所的には B スプラインの歪みを加えた輪郭線 $\mathbf{Q} \in S$ を求める。

この場合、次式に示す求める輪郭線 $\mathbf{Q}$ とテンプレート $\mathbf{Q}_0$ との回転と平行移動に対して不変な誤差項および抽出輪郭線 $\mathbf{Q}_f$ と求める輪郭線との2つの誤差項の重み付き和を最小にする輪郭線を求めればよい。

$$\min_{\mathbf{Q}} \{ (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0)^T \bar{S} (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0) + \|\mathbf{Q} - \mathbf{Q}_f\|^2 \} \quad (4)$$

平方完成により、 $\mathbf{Q}$ に関する二次形式と定数項の形に展開することができ、次式の最小解を得ることができる⁸⁾。

$$\hat{\mathbf{Q}} = (\bar{S} + \mathcal{U})^{-1} (\bar{S} \mathbf{Q}_0 + \mathcal{U} \mathbf{Q}_f) \quad (5)$$

ただし、 $\bar{S} = \alpha E^d T U E^d$, $E^d = I - W W^+$ で、 W^+ は W の一般化逆行列、 I は単位行列で $\mathcal{U}$ は次式により定義される B スプラインの基底関数によって計算される計量行列である。

$$\mathcal{U} = \begin{pmatrix} B & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix}$$

α は2つの誤差項を調整するパラメータである。

3.2 単独 ASM による更新ステップ

ASM を用いて道路を1本ずつ取り出して更新する場合の手続きを述べる。この処理を単独 ASM による更新ステップと呼ぶことにする。ネットワーク型 ASM による複数道路の同時更新手法は次章で述べる。

STEP2.1 道路データベースから1本の道路を取り出し、B スプラインで近似した曲線を $\mathbf{r}(s)$ とする。このときの B スプライン制御点列を形状テンプレート $\mathbf{Q}_0$ とする。

STEP2.2 $\mathbf{r}(s)$ をパラメータ s に対して間隔 Δs でサンプリングした点列を $\{\mathbf{r}_n\}$ とする。その法線方向に長さ l_s の探索範囲を設ける。

STEP2.3 $\{\mathbf{r}_n\}$ の各法線方向を軸にラインフィルタを画像にかけ、フィルタ応答が最大となる点列 $\{\mathbf{r}'_n\}$ を求める。 $\mathbf{r}_n$ と $\mathbf{r}'_n$ を線形補間した中間点を $\mathbf{r}_n^* = \mathbf{r}_n + \beta(\mathbf{r}'_n - \mathbf{r}_n)$ として計算する。

STEP2.4 点列 $\{\mathbf{r}_n^*\}$ を B スプラインで近似し、そのときの制御点列を $\mathbf{Q}_f$ とする。

STEP2.5 $\mathbf{Q}$ を式 (5) により得られる $\hat{\mathbf{Q}}$ で置き換える。

STEP2.6 探索範囲を制御するパラメータ l を

$$l_s \leftarrow \gamma l_s \quad (0 < \gamma < 1)$$

と減少させて、STEP2.2~STEP2.6 を前回との変形量が十分小さくなるか、所定の回数を超えるまで繰り返す。

STEP 2.7 最終的に得られた $\hat{\mathbf{Q}}$ から B スプライン

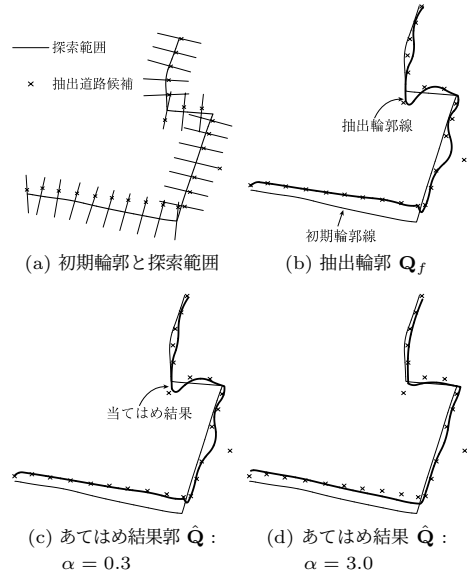


図3 形状テンプレートのあてはめの例
Fig. 3 Examples of fitting the shape template.

ン曲線を構成し、これを更新結果とする。

図3に単独 ASM の1回の更新の様子を示す。(a)の黒線は初期輪郭線 $\mathbf{r}(s)$ である。 $\mathbf{r}(s)$ に直交する黒線はサンプリング点列 $\{\mathbf{r}_n\}$ での探索範囲で、 $\times$ 印は探索範囲内で求めた輪郭点列 $\{\mathbf{r}'_n\}$ である。(b)~(c)の点線は $\times$ 印を B スプライン近似した曲線で、太い黒線は順にパラメータ α を 0.3 および、3.0 と変化させたときの式 (5) により得られる B スプライン曲線である。 α の値が大きいほど初期輪郭の形状を保存して変形していることが分かる。

3.3 ラインフィルタリングによる道路探索

ここでは、STEP2.3 のラインフィルタリングについて述べる。ASM で画像処理を用いて $\mathbf{Q}_f$ を求めるためには、相関フィルタもしくはエッジフィルタを用いることが多いが、本研究では対象物の輝度値の断面図がライン状であると分かっているため、次式で定義される箱型フィルタ $h(u)$ を考える。

$$h(u) = \frac{1}{4w} \{ H(u - 3w) - H(u + 3w) \} - \frac{3}{4w} \{ H(u - w) - H(u + w) \} \quad (6)$$

ここで、 $H(u)$ はステップ関数で w はラインフィルタの幅のパラメータである。続いてノイズ低減のため、このフィルタに分散 σ のガウス関数、

$$g(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right)$$

を畳み込むと次式となる。

$$h * g(u) = \frac{3}{4w\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \text{Erf} \left(\frac{w-u}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \text{Erf} \left(\frac{w+u}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} - \frac{1}{4w\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \text{Erf} \left(\frac{3w-u}{\sqrt{2}\sigma} \right) + \text{Erf} \left(\frac{3w+u}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \quad (7)$$

ただし、式の Erf は誤差関数である。ラインフィルタの幅パラメータ w は、画像中の対象道路幅により設定する必要がある。縮尺 1/25,000 の数値地図は、道路の幅員情報として、(a) 3m 以上 5.5m 以下、(b) 5.5m 以上 13m 以下、(c) 13m 以上、いずれかの属性を持つため、それぞれに対応する $w = 4, 9, 13$ の幅パラメータを持つラインフィルタを用いる。図 4(a) に、 $w = 4, 9, 13$ および $\sigma = 3.5$ の場合のラインフィルタを示す。

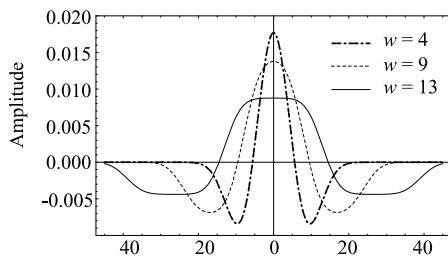
実際には、さらに図 4(b) に示すように各探索中心点 $\{\mathbf{r}_n\}$ を原点に、探索方向 u および接線方向 v の座標系を考え、 v 方向に幅 $2w_s$ を持つ 2 次元のラインフィルタ、

$$z(u, v) = \begin{cases} h * g(u) & -w_s \leq v \leq w_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

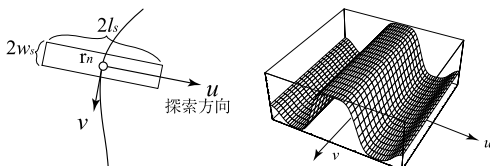
を用いる (図 4(c))。

3.4 特徴画像への変換

ASM はラインフィルタの応答値に従って変形するため、処理結果は入力画像の画素値に大きく依存する。単純な RGB 値の明度値を入力画像として用いると、コンクリートなどの明るい建物上にラインフィルタの最大応答値が検出される恐れがある。そこで、入力画



(a) 平滑化ラインフィルタ



(b) 探索範囲

(c) 二次元ラインフィルタ

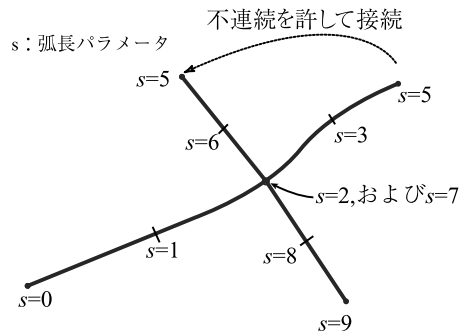
図 4 ラインフィルタの構成

Fig. 4 An outline of the line detector.

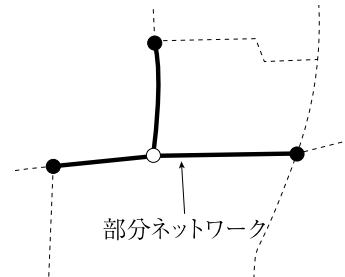
像として RGB 値の明度値をそのまま用いるのではなく、前処理により道路領域を強調し、背景領域を抑制した画像を用いる。具体的には、道路色特徴が多次元正規分布に従うと仮定し、各画素に道路のゆう度値を輝度値として割り当てる。各画素のゆう度は、あらかじめ与えた画像サンプルから得られる平均ベクトルと共分散行列を用いて求めることができる。

4. ネットワーク型 ASM による更新システム

各道路が隣接する道路に影響されながら、少しずつ変形可能なネットワーク型 ASM について述べる。基本的なアイデアは図 5(a) のように複数の道路を、不連続を許して 1 本の道路と見なすことで ASM をネットワーク型へ拡張したことである。また、交差点上の制御点は一致するように制約を加える。更新処理は図 5(b) の実線のようにネットワーク全体を小さな部分ネットワークに分割し、ASM の変形を加える。各部分ネットワークは、1 本の道路と見なしているため 3.2 節で述べた単独 ASM の更新アルゴリズム STEP2.2～STEP2.5 をそのまま用いることができる。同様の処理を、すべての部分ネットワークに適用し、道路ネットワーク全体を逐次的に更新する。部分ネットワークは交差点ノードを 1 つ選択し (図 5(b) の白丸に相当)、それに隣接する道路片 (図 5(b) の実線に相当) を取



(a) 2 本の道路を不連続点を含む長い 1 本の道路で表現した例



(b) 部分ネットワークの例

図 5 部分ネットワークの表現

Fig. 5 Representation of sub-networks.

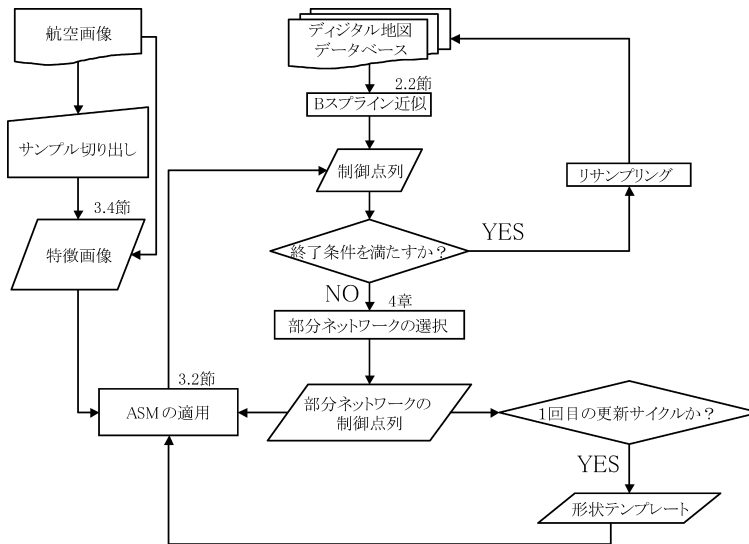


図 6 道路更新システム

Fig. 6 A proposed system of road updating.

り出し、これを部分ネットワークとする。なお、ネットワーク間の道路のつながりを保持するために、更新の際には部分ネットワークの端点を固定して変形を行う。このとき、固定された端点は移動することができないが、別の部分ネットワークでの更新ステップの際には、この端点は更新可能な節点となるため、最終的にはすべての節点が更新されることになる。

すべての節点が更新されるまでを、1つの更新サイクルとし、一定の更新サイクル数をこなすか、次式で示す各ノード間の道路の1回の更新サイクルの平均変化量 d^k が、一定の閾値 d_{PL} 以下になるまで繰り返す。

$$d^k = \frac{1}{N_{PL}} \sum_i \|\mathbf{Q}_i^k - \mathbf{Q}_i^{k-1}\| \quad (9)$$

ここで、 N_{PL} はネットワーク全体のノード間の道路数で、 $\mathbf{Q}_i^k$ は k 回目の更新サイクルでの各ノード間の道路を構成する制御点列である。

図 6 に、ネットワーク型 ASM による更新システムの概要図を示す。数値地図はベクタ形式でデータベースに格納されているが、更新システムでは B スプライン近似により得られる制御点位置の更新を行うことになる。更新サイクルにより各制御点の更新を行った後に、各道路の B スプライン曲線が等間隔でサンプリングされ、再びもとのデータベースに格納される。

5. 実験および検討

提案システムを用いて実際の RGB カラー航空画

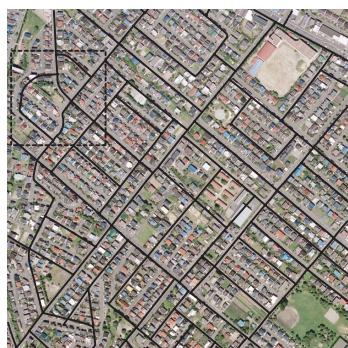
像[☆]と縮尺 1/25,000 の道路地図を用いて更新処理を行った。実験画像は2枚の郊外の住宅街画像 (図 7 (a), 図 8 (a)) と田舎の画像 (図 9 (a)) で、すべて縦横 1,400 × 1,400 画素の大きさである。図の黒線は縮尺 1/25,000 の数値地図^{☆☆}である。入力画像の地表解像度は 50 cm/pixel である。

数値道路は 15 pixel ごとに折線近似され、その折線を 45 pixel ごとにノットを挿入し B スプラインで近似した。動的形状モデルのパラメータはすべて $\alpha = 3.0$, $\beta = 0.1$ を設定した。道路探索のためのパラメータは $\Delta s = 1.0$, $l_s = 35$, $w_s = 20$, $\gamma = 0.95$ と設定した。更新サイクルの収束条件の閾値は $d_{PL} = 0.1$ とした。用いた計算機の性能は、プロセッサが AMD-Athlon64/2800+でメモリは 512 MB である。

図 7 (b), 図 8 (b) および図 9 (b) は提案手法により更新した結果である。図 10 (a), 図 10 (b) および図 10 (c) は、それぞれ図 7 (a), 図 8 (a), および図 9 (a) の点線で囲んだ部分を拡大した結果である。図の点線は既存の縮尺 1/25,000 の数値地図で、実線は提案手法により更新した結果である。更新前では、航空画像の住宅部分に数値道路が重なっているが、更新処理後は正しく道路部分に数値道路が重なっていることが確認できる。また、ASM の形状テンプレートのあてはめにより、多少の影や障害物があっても正しく画像中の道路内に収束し、カーブ道路および L 字カーブの形

[☆] (株) デジタルアーステクノロジー社のオルソ航空画像である。

^{☆☆} 国土地理院が発行する数値地図 25000 を用いた。



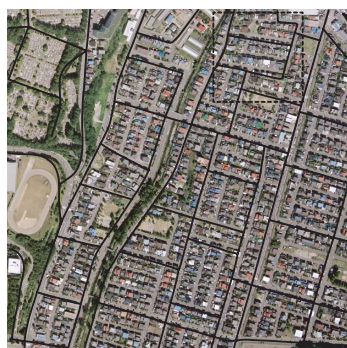
(a) 既存の縮尺 1/25,000 数値地図



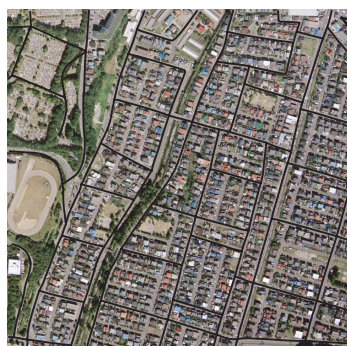
(b) 提案手法による更新結果

図 7 住宅街 1 での更新結果

Fig. 7 Results of suburban1.



(a) 既存の縮尺 1/25,000 数値地図



(b) 提案手法による更新結果

図 8 住宅街 2 での更新結果

Fig. 8 Results of suburban2.



(a) 既存の縮尺 1/25,000 数値地図



(b) 提案手法による更新結果

図 9 田舎での更新結果

Fig. 9 Results of rural area.

状を保ちながら良好に更新できていることが確認できる。さらに、ネットワーク型 ASM により、交差点間のつながりを保ちながら更新ができ、特別な交差点位置の推定処理を行わずに、道路と交差点位置が同時に更新できていることが分かる。

提案手法の定量的な評価を行うために、更新結果と縮尺 1/2,500^{*}の数値地図と比較を行った。評価は抽出輪郭を 5 m ごとにサンプルした点と縮尺 1/2,500 の数値地図との法線方向の距離を算出し、その RMS 誤差を求めた。結果を表 1 および図 11 に示す。住宅街 1 では、縮尺 1/25,000 の道路地図での RMS 誤差は 5.04 m であったが、更新後は 2.16 m へと約 3 m ほど減少した。3 枚の画像のうち、最も画像と数値地図とのずれがみられた田舎の画像での RMS 誤差は 10.04 m から 3.21 m へと約 7 m ほど減少した。図 11 の各グラフ上の縦線は、式 (9) の収束条件に達したことを示している。RMS 誤差の減少が停滞したあたりで更新サイクルが打ち切られていることから、式 (9) の収束条件が妥当であると分かった。

計算時間に関しては、対象地区の面積が 500 km²^{☆☆}である場合、提案手法の処理能力は約 35 分/km²であるので、約 292 時間が計算に必要となる。複数の計算機を用いてパッチ処理を行えば、数日以内に終わらせることが可能であり、現実的な処理能力だといえる。

更新後の約 2~3 m のずれの原因は、道路中心線を簡単なラインフィルタの最大応答箇所によって決定しているためで、必ずしもフィルタの応答最大箇所が実際の道路中心線ではないこと、および比較に用いた縮尺 1/2,500 の数値地図の誤差に起因していると考えられる。より正確な道路中心線を見つけるためには、平行エッジの探索や白線認識ルーチンなどのより高度な画像処理部を ASM の更新ステップに組み込む必要がある。

提案手法の有効性を見るために、同一箇所での更新結果の比較を行った。比較には、B-Snakes 法を用いた。これは ASM のパラメータ $\alpha = 0$ と設定することで実装可能である。比較結果を図 12 (a)、図 12 (b) および図 12 (c) に示す。図 12 (a) の B-Snakes は道路上の影や植物を避け、近くの道路の色に似た建物へと

^{*} 国土地理院が発行する数値地図 2500 を用いた。

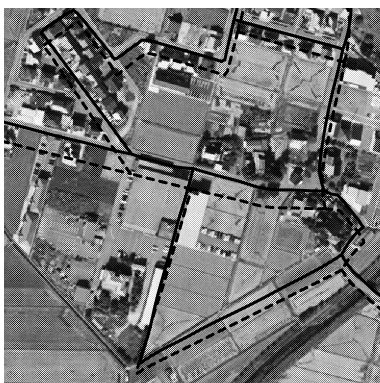
^{☆☆} 北九州市に相当する面積である。



(a) 住宅街 1



(b) 住宅街 2



(c) 田舎

図 10 結果の拡大図

Fig. 10 Zoomed versions of the results.

表 1 縮尺 1/2,500 の数値地図との比較による評価結果

Table 1 Results of evaluations by comparing the with 1/2,500 digital maps.

	RMS errors [m]		更新回数	計算時間 [分]
	更新前	更新後		
住宅街 1	5.04	2.16	17	16.67
住宅街 2	5.90	3.22	22	21.35
田舎	10.04	3.21	24	13.25

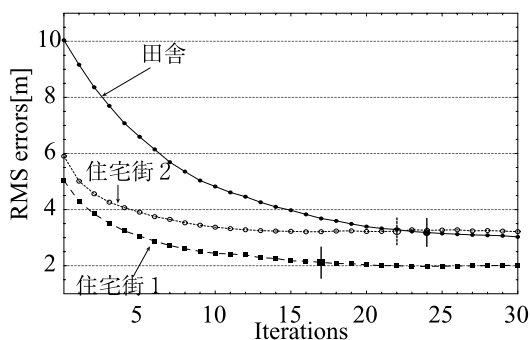


図 11 RMS 誤差の推移

Fig. 11 Convergence of RMS errors.

誤って収束し、各所でおかしな振動が見られた。

しかし、形状テンプレートをあてはめることにより、これらの振動は抑えられ、影を含む道路に対しても前後の抽出結果から正しい道路位置を推定できた(図 12 (b))。しかしながら、各ノード間の道路はそれぞれ独立に更新されているため、交差点間で不自然な不連続が生じている。また、同様に建物への誤った収束も確認できる。この結果の延長成分から交差点位置を推定すると、誤った交差点位置が推定されると予想される。

一方で、図 12 (c) のネットワーク型 ASM では、各ノード間の道路のつながりを保ちながら少しずつ変形することで、上記のすべての問題を解消できていることが確認できる。1 本の輪郭線が建物上へ収束しようとしても、隣接する別の輪郭線が道路側へと引っ張るため、上記 2 つの手法で見られた建物への誤収束が避けられている。表 2 に、図 13 での各手法の更新結果と縮尺 1/2,500 の数値地図との RMS 誤差を示す。

ASM のネットワーク化の効果を見るために、抽出した交差点位置と縮尺 1/2,500 の数値地図上の交差点位置との RMS 誤差を測った。図 13 (a), 図 13 (b), 図 13 (c) は、それぞれ、図 8 (a) での既存の縮尺 1/25,000 の数値地図、単独 ASM およびにネットワーク型 ASM の交差点位置のずれを比較した結果である。単独 ASM の交差点位置は、抽出した道路中心線の端点の延長成分より推定した。図の黒丸は交差点を表し、縮尺 1/2,500 の数値地図上の交差点位置とのずれを黒線で示している。図 13 (b) と図 13 (c) の点線で囲んだ部分は、ネットワーク型 ASM によって大きく改善された交差点箇所である。表 3 に、それぞれの RMS 誤差値を示す。ネットワーク化により、誤差値が 6.26 m から 5.40 m へ改善された。ただし、表 1 に比べて誤差が大きくなった原因は、交差点で交差する 2 本の道路のそれぞれの誤差が加わったためだと考えられる。



(a) B-Snakes による更新結果 (従来手法)



(b) 単独 ASM による更新結果 (提案手法)



(c) ネットワーク型 ASM による更新結果 (提案手法)

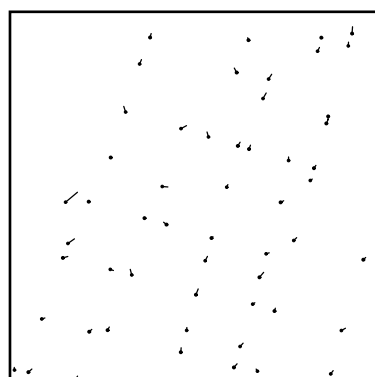
図 12 同一箇所での更新結果の比較

Fig. 12 Comparison of the results in the same area.

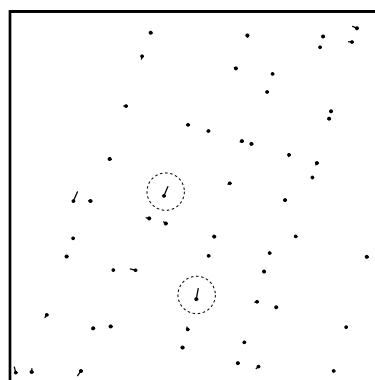
表 2 図 13 の各手法による比較結果

Table 2 Comparisons of the results of Fig. 13 by each methods.

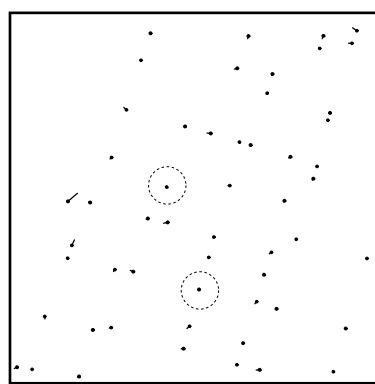
	RMS errors [m]
1/25,000 数値地図 (初期値)	5.05
B-snakes (従来手法)	5.12
単独 ASM (提案手法)	4.18
ネットワーク型 ASM (提案手法)	3.21



(a) 縮尺 1/25,000 数値地図との比較結果



(b) 単独 ASM との比較結果



(c) ネットワーク型 ASM との比較結果

図 13 各手法の結果と縮尺 1/2,500 数値地図との交差点位置の精度比較

Fig. 13 Comparisons of the accuracy of the positions of the extracted intersections by each methods with 1/2,500 digital maps.

表 3 交差点位置の精度比較結果

Table 3 Comparisons of the accuracy of the positions of the extracted intersections by each methods.

	RMS errors [m]
1/25,000 数値地図	9.00
単独 ASM	6.26
ネットワーク型 ASM	5.40

なお、画像上では道路が存在するにもかかわらず結果として道路輪郭が認識されていない箇所があるが、これは既存の縮尺 1/25,000 の数値地図自体にこれらの道路情報を含まないためである。この特殊な場合として、数値地図上の 1 本の道路に対して、形状の正しい並走する 2 本の航空画像上の道路がある場合に、ASM がどちらに収束すればよいか判断がつかなくなる場合がある。このような場合は人間の目でも判断が難しいため、既存の数値地図を航空画像に合わせた後に数値地図に含まれない新たな道路を抽出する処理が今後必要であると考えられる。また、今回の実験結果では見られなかったが、部分ネットワーク単位での更新では、異なる部分ネットワーク上の別の道路が交差する恐れがある。たとえば、住宅密集地帯などの複雑な地域では異なる道路間の距離が探索範囲よりも狭いため、このような問題が生じる可能性がある。この対処法として、道路間で交差する可能性が高い交差点ノードをまとめて部分ネットワーク化を行う方法が考えられる。

6. む す び

本論文では、与えた形状を保ったまま変形可能な ASM を用いて、既存の数値地図データを航空画像にマッチングする方法を提案した。さらに、ASM をネットワーク状に拡張することで、各道路が隣接する道路に影響されながら、少しずつ変形できるネットワーク型 ASM を提案した。この方法により、道路間のつながりを保ったまま、道路と交差点位置が同時に更新できることを示した。実際に、提案システムを用いて航空画像と縮尺 1/25,000 の数値地図を用いて抽出実験を行い、縮尺 1/2,500 の数値地図と比較を行った結果、RMS 誤差で約 5~10 m ずれている縮尺 1/25,000 の数値地図を、約 2~3 m まで精度を高めることができた。今後は、ASM の画像処理部を強化することで抽出精度の向上を図り、影や障害物を多く含む複雑な地域に対処するため、レーザスキャナなどで得られた標高データや高ダイナミックレンジを持つマルチスペクトル画像の利用を検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: Active contour models, *International Journal of Computer Vision*, Vol.1, No.4, pp.321-331 (1988).
- 2) Gruen, A. and Li, H.: Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.50, pp.11-20 (1995).
- 3) Fua, P. and Leclerc, Y.: Model Driven Edge Detection, *Computer Vision, Computer Vision*, Vol.3, No.1, pp.45-56 (1990).
- 4) Menet, S., Saint-Marc, P. and Medioni, G.: B-snakes: Implementation and application to stereo, *3rd International Conference on Computer Vision*, pp.720-726 (1990).
- 5) Klang, D.: Automatic Detection of Changes in Road Databases Using Satellite Imagery, *Proc. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.32, pp.293-298 (1998).
- 6) Bader, M.: Energy Minimization Methods for Feature Displacement in Map Generalization, Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Zurich (2001).
- 7) Cootes, T.F., Taylor, C.J., Cooper, D.H. and Graham, J.: Active shape models-their training and application, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.61, No.1, pp.38-59 (1995).
- 8) Blake, A. and Isard, M.: *Active Contours*, Springer (1998).
- 9) Zhang, C.: Updating of Cartographic Road Database, Ph.D. Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich (2003).

(平成 18 年 3 月 31 日受付)
(平成 18 年 10 月 3 日採録)

上 瀧 剛 (学生会員)



平成 14 年熊本大学工学部数理情報システム工学科卒業。平成 16 年同大学院博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。現在、同課程在学中。航空画像解析、コンピュータビジョンの研究に従事。

内 村 圭一 (正会員)



昭和 50 年熊本大学工学部電子工学科卒業。昭和 52 年同大学院修士課程修了。同年熊本電波高等専門学校助手。昭和 55 年熊本大学工学部助手、助教授を経て、現在、同大学院教授。平成 4~5 年マクマスタ大学(カナダ)客員研究員。工学博士。高度道路交通システム、画像処理・認識、最適化の研究に従事。電気学会会員。

**胡 振程**

平成 4 年中国上海交通大学工学部
自動制御工学科卒業。平成 10 年熊
本大学大学院修士課程修了。平成 13
年同大学院博士課程修了。平成 13～
15 年カナダ Matrox 社勤務。平成 16
年から熊本大学助教授。学術博士。画像処理・認識、
マシンビジョン、拡張現実感、高度道路交通システム
の研究に従事。電子情報通信学会，IEEE 各会員。
