

航空画像と動的形状モデルを用いた道路地図の位置補正

上瀧 剛[†] 内村 圭一[†] 胡 振程^{††}

[†] 熊本大学大学院自然科学研究科, 熊本市

^{††} 熊本大学工学部 熊本市

あらまし 本研究では既存の縮尺 1/25,000 の道路地図から取り出した形状をテンプレートとして, 航空画像にマッチングさせて, より高精度な道路地図へと更新することを目的としている. マッチングには与えられた形状をある程度保ったまま変形可能である動的形状モデル (Active shape model) を用いて補正する方法を提案する. 輪郭線はラインフィルタリングに従って航空画像と正しく重ねあうように少しずつ変形する. 航空画像と数値地図を用いて実験を行い, 本手法の有効性を示す.

キーワード 航空画像, 動的形状モデル, 道路, 位置補正

Refining Road Position from Aerial Images Using Active Shape Model

Go KOUTAKI[†], Keiichi UCHIMURA[†], and Hu ZHENCHENG^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto-city, Kumamoto, 860-8555 Japan

^{††} Department of Computer Science, Kumamoto University Kurokami 2-39-1, Kumamoto-city, Kumamoto, 860-8555 Japan

Abstract In this paper, we aim to update the road map more precisely by matching the existing 1/25,000 scaled road map to aerial images. we proposed new method to refine the positions of road center line preseving existing road shapes of road database using active shape model. The active shape model gradually transform to fit given aerial images according to the line filtering. The proposed method is validated by experimental tests using aerial images and existing road maps.

Key words Aerial imagery, Active shape model, road, refining position

1. ま え が き

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おいてデジタル道路地図は必要不可欠であるが, わが国の都市部を除く多くの地域の地図は縮尺 1/25,000 の国土基本図から作成されており, これは数 10m の誤差を含んでいる. 近年, 高精度な GPS やオルソ航空画像とこれらのデジタル地図データと併せて用いられるようになってきたが, 既存の縮尺 1/25,000 程度での地図の位置精度では十分でなくなっている. 例えば, 航空写真と道路地図を重ね合わせると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にマッチさせて位置補正を図る研究が数多くなされてきた. 初期輪郭線を地図データにより与えた動的輪郭モデル (snakes[1]) は有効であるが, 望む輪郭線に収束するためのパラメータの設定が難しく安定性に問題がある. 輪郭線を望む位置に収束するように安定して求めるために動的計画法 [2] や B スプライン当てはめを使った手法

[3](B-snakes) がこれまで提案されてきた.

事前に対象物の形状が分かっている場合には, B-snakes のように自由に変形させるのではなく, あらかじめ用意した形状テンプレートを抽出輪郭線に当てはめを行なうことで, 雑音に強く安定した輪郭線を求めることが可能である. 動的形状モデル [4](Active shape model) は, 自由変形とテンプレート当てはめの両方を兼ね備えた柔軟なモデルである. このアプローチはビジョンでの対象物の姿勢推定や追跡に用いられてきたが [4], 航空画像解析に応用した例はない. そこで, 本研究では動的形状モデルを用いて既存の地図データを航空画像にマッチさせて位置補正を行なった.

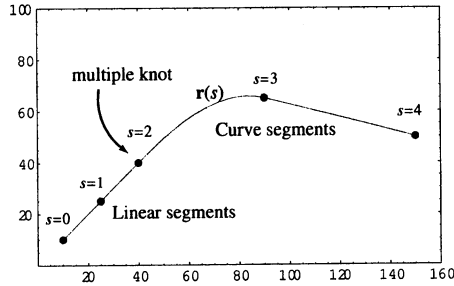
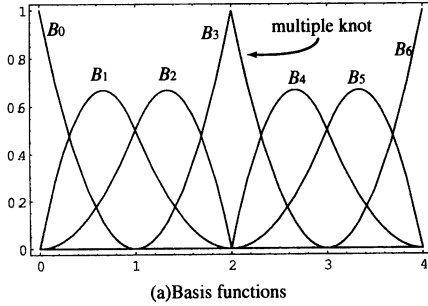
2. スプラインによる輪郭表現

対象物の輪郭を表現するため, 区分的な 2 次または 3 次多項式で定義されるスプライン曲線を用いることが一般的である. 特に, B スプライン曲線 $\mathbf{r}(s) = (x(s), y(s))^T, 0 \leq s \leq L$ は N 個の基底関数 $B_n (n = 0, 1, \dots, N-1)$ の重み付き和で次のよう

に表される。

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

ここで q_n^x および q_n^y は曲線を制御する重みパラメータである。基底関数の台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直線とカーブの接合点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に多重ノットを含む2次のBスプライン基底関数列と道路の表現例を示す。



(b)Representation of road center line using B-spline

図1 Bスプラインによる道路中心線の表現

2.1 数値地図からの変換

本研究は縮尺 1/25,000 の数値道路データの位置補正を目的としている。動的形状モデルを用いるためには、まずこれらのデータを B スプライン曲線で近似する必要がある。数値道路データは交差点や行き止まり等の道路ネットワークリンク間を一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が、数値道路データには屈曲点は明示されていないので、以下の手順で屈曲点を検出し多重ノット位置を特定する。

STEP1.1 地図データベースから一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 $\kappa[n]$ を計算し、閾値を超え、なおかつ $\kappa[n]$ 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。

以上の処理により、B スプラインで表すべき制御点の個数と多重ノットの位置が決定される。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 $\mathbf{Q}^x = \{q_n^x\}$ および $\mathbf{Q}^y = \{q_n^y\}$ を求める。一般に、任意の曲線 $f(s)$ に対して L_2 ノルムが最小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 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。今、近似したい曲線は点列からなる折線なので、式 (2) を計算する簡単な方法は、

$$\mathbf{Q} = \mathbf{B}^{-1} \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \mathbf{B}(s_n) f(s_n) ds \quad (3)$$

と M 点サンプリングした点列での計算に置き換えることであるが、積分誤差が大きく近似された B スプライン曲線の始点と終点位置が大きすぎてしまうことがある。したがって、近似したい点列を線形もしくは 2 次のスプラインで補間した後に式 (2) の積分計算を行なう。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、その内の一本を B スプラインで近似した例を示す。図の太線は B スプライン近似した道路で、丸は検出した屈曲点である。

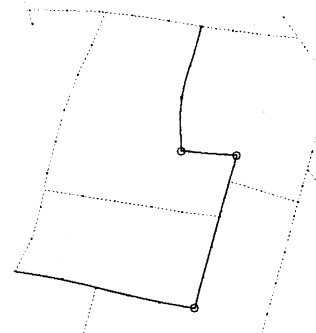


図2 Bスプラインによる数値地図の表現

3. 動的形状モデル

B スプラインで表現された道路輪郭を画像にマッチするように変形させることで道路位置の補正を行なう。動的形状モデルは与えられた輪郭を望む位置に平行移動や回転およびスケールだけでなく、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なうことができる。

3.1 形状空間と変形パラメータの推定

S を N 個の制御点がある B スプラインの空間とする。 S_s を、ある B スプライン曲線 $Q_0 \in S$ を相似変換（回転，平行移動および拡大縮小）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4つのパラメータ $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ で線形に表現することができる。 \mathbf{X} を形状空間 (shape space) と呼ぶ。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{W}\mathbf{X} + \mathbf{Q}_0 \quad (4)$$

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

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 Q_0 の xy 座標値の縦ベクトルである。

画像処理などで得られた輪郭線 $Q_f \in S$ をテンプレート Q_0 にノルムの最小二乗となるように当てはめる問題は、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、上記の相似変換のみによって補正できることは稀である。そこで、テンプレートを輪郭線 Q_f に当てはめるときにある程度の変形も許すような輪郭線 $Q \in S$ を求める。この場合、次式のように相似変換に不変な量に変換した時の誤差と輪郭線そのものの誤差の和を最小にする輪郭線を求めればよい。

$$\min_{\mathbf{Q}} \{ (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0)^T \bar{S} (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0) + \|\mathbf{Q} - \mathbf{Q}_f\|^2 \} \quad (5)$$

この推定解は次式となる。

$$\hat{\mathbf{Q}} = (\bar{S} + \mathbf{U})^{-1} (\bar{S}\mathbf{Q}_0 + \mathbf{U}\mathbf{Q}_f) \quad (6)$$

ただし、 $\bar{S} = \alpha E^d U E^d$ 、 $E^d = I - WW^+$ で、 W^+ は W の一般化逆行列、 I は単位行列で 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。

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

α は二つの誤差項を調整するパラメータである。

4. 道路地図の位置更新手法

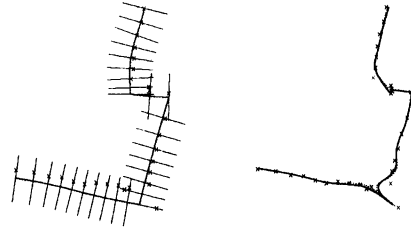
次の手順で既存の道路地図を更新する。

STEP2.1 道路データベースから一本の道路を取り出し、 B スプラインで近似した曲線を $r(s)$ とする。このときの B スプライン制御点列をテンプレート Q_0 とする。

STEP2.2 $r(s)$ 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 $\{r_n\}$ 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 $\{r_n\}$ 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 $\{r'_n\}$ を求める。 r_n と r'_n を線形補間した中間点を $r_n^* = r_n + \beta(r'_n - r_n)$ として計算する。

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



(a) 初期輪郭と探索範囲

(b) $\alpha = 0.3$

(c) $\alpha = 3.0$

(d) $\alpha = 10.0$

図3 テンプレート当てはめ

STEP2.5 Q を式 (6) により得られる \hat{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 を所定の回数繰り返す。

STEP 2.7 最終的に得られた \hat{Q} から B スプライン曲線を構成し地図データベースを更新する。

図3にテンプレート当てはめの様子を示す。(a)の黒線は初期輪郭線 $r(s)$ である。 $r(s)$ に直交する黒線はサンプリング点列 $\{r_n\}$ での探索範囲で、 \times 印は探索範囲内で求めた輪郭点列 $\{r'_n\}$ 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, 3.0, 10.0 と変化させたときの式 (6) により得られる B スプライン曲線である。 α の値が大きいく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。

4.1 ラインのフィッティング

通常、動的輪郭モデルでは Q_f を計算するために相関フィルタもしくはエッジフィルタを用いるが、本研究では対象物の輝度もしくは特徴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 STEP2.2 で用いる。

$$h(u) = \frac{1}{4w} \{ H(u - 3w) - H(u + 3w) \} + \frac{3}{4w} \{ H(u - w) - H(u + w) \} \quad (7)$$

ここで、 $H(u)$ はステップ関数で w は対象道路の幅である。続いてノイズ低減のため、このフィルタにガウス関数、

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

を畳み込む。図4に平滑化された箱型フィルタ形状を示す。実際には、図5に示すように各探索中心点 $\{r_n\}$ 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 $2w_s$ を持つ二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。

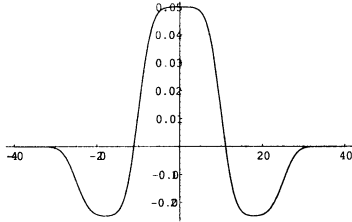
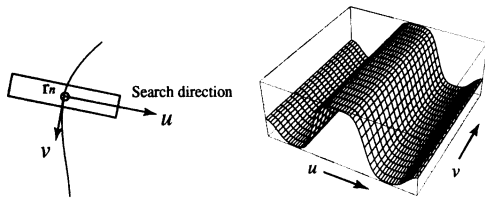


図4 平滑化箱型ラインフィルタ



(a) Search direction and width (b) 2-dimensional line detector

図5 2次元ラインフィルタ

4.2 画像特徴

ラインフィルタを適用する画像として何を用いるのかを考える。簡単な方法は、道路面が背景よりも明るい色を持つと仮定して、入力画像の明度値を画像特徴として用いることであるが、抽出輪郭がコンクリートなどの明るい部分に引きずられる恐れがある。道路面が明るく背景が暗くなるような画像は次の方法で作ることができる。

STEP3.1 入力画像から道路サンプルを切り出し、特徴空間上での平均ベクトル μ と共分散行列 Σ を計算する。

STEP3.2 入力画像の各画素の特徴ベクトルに対して、平均ベクトル μ と共分散行列 Σ とのマハラノビス距離を明度値とする画像 I_m を作成する。

STEP3.3 I_m を $[0, 255]$ でスケールリングし、ネガティブ処理を行なった画像を入力特徴画像 I_f とする。

ここである特徴ベクトル p に対するマハラノビス距離は以下の式で定義される。

$$M(p; \mu, \Sigma) \equiv (p - \mu)^t \Sigma^{-1} (p - \mu) \quad (9)$$

入力画像の特徴空間は、例えば RGB の 3 次元の特徴ベクトルを用いる。図6に上記の画像変換により得られた入力特徴画像の例を示す。



図6 特徴画像

5. 実験および検討

図7に示す 2000×2000 画素の大きさを持つ住宅街の航空画像に対して実験を行った。航空画像の特性を表1で示す。入力画像の地表解像度は $50\text{cm}/\text{pixel}$ である。ラインフィルタのパラメータは $w = 10, \sigma = 2.5$ を設定し、動的形状モデルのパラメータは $\alpha = 3.0$ を設定した。道路探索のためのパラメータは $\Delta s = 0.5, l_s = 80, w_s = 20, \beta = .5, \gamma = .9$ と設定した。

図8は最終的な更新結果である。図の黒線は更新した道路で点線は既存の縮尺 $1/25,000$ の数値地図の道路中心線を示す。図9~10は、既存の数値地図と更新結果を入力航空画像に重ねて拡大表示したものである。図の黒線は更新した道路で白い点線は既存の縮尺 $1/25,000$ の数値地図の道路中心線を示す。

図9において、既存の数値地図では道路が建物上にずれて配置されているが、更新結果は画像の道路中心位置の付近に合わせて変形されていることが確認できる。図8の右下の直線道路からなる箇所は、図9と同様に正しく画像にフィットすることが確認できた。

図10のカーブ道路は良好に更新されているが、もともとカーブ道路と接合していた交差点の箇所が正しく更新されていない。これは、本手法が道路を一本ずつ独立に更新処理を行なっているため、道路ネットワークの接続関係を無視しているためである。

表1 航空画像特性

Table 1 Image specification	
チャンネル	RGB3 バンド
諧調	256
スキャン解像度	$25\mu\text{m}$
撮影高度	約 3000m
画像縮尺	約 $1/20,000$
地表解像度	$50\text{cm}/\text{pixel}$



図7 対象地域



図9 更新結果：カーブを含む箇所



図8 1/25,000 数値地図(点線)と更新結果(太線)



図10 更新結果：分岐道路

提案手法の有効性を見るために、B-snakes との比較結果を図11に示す。B-snakesは提案手法のSTEP2.5を省略した手続きとなる。同図の(a)に示す入力画像と初期輪郭線に対して、提案手法により輪郭線を変形させた結果が(b)および(c)である。それぞれ、更新ステップを1回および5回反復させた結果である。(d)はB-snakesを5回作用させた結果である。自由に変形しすぎるB-snakesに対して、提案手法が元の道路形状を利用してより自然に画像にフィットしていることが分かる。

6. まとめと今後の課題

本研究では既存の縮尺1/25,000の道路地図から取り出した形状をテンプレートとして航空画像にマッチングさせて、道路地図を更新した。マッチングには与えられた形状をある程度

保ったまま変形可能である動的形状モデルを用いて補正した。新しい輪郭線はラインフィルタリングを利用して探索された。実験により、提案手法が従来のB-snakesと比べてL字やカーブ道路や直線道路などの形状を保ちつつ、画像に正しくフィットすることが確認できた。

今後の課題は、道路を一本ずつ独立に更新するのではなく、複数の道路を単位にネットワーク状の動的形状モデルを作成し、より自然な道路形状の変形を行なうことである。また、ラインフィルタリングのパラメータ w, σ は対象とする道路の幅および画像特徴値や雑音量により決定されるべきである。したがって、具体的なラインモデルを用いたラインフィルタの応答解析を行い、この二つのパラメータの決定方法を検討する予定である。



(a) 入力画像と初期輪郭

(b) 提案手法の結果: 1回反復



(c) 提案手法の結果: 5回反復

(d) B-snakes の結果

図 11 B-snakes との比較

文 献

- [1] Michael Kass, Andrew Witkin and Demetri Terzopoulos, "Snakes: Active Contour Models," Computer Vision, Vol.1, No.4, pp.321-331, 1988
- [2] A.Amini, "Using Dynamic Programing for Solving Variational Problems in Vision," PAMI, vol.12, no.9, pp.855-867, 1990
- [3] S. Menet, P. Saint-Marc, and G. Medioni, "B-snakes: Implementation and application to stereo," In Proceedings of Third International Conference on Computer Vision, pp.720-726, 1990
- [4] Andrew Blake and Michael Isard, "Active Contours," splinger, 1998