

適応パラメータ ASMs による上空画像からの道路地図の更新

上瀬 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

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などの上空画像にマッチさせ、道路地図をより高精度な位置へ補正することを目的としている。マッチングには既存の数値地図の形状と道路のネットワークの繋がりをある保ったまま変形可能である Network Active Shape Models(以下, NASMs)を用いて補正する。その際の, NASMs の固さを調整するパラメータを自動的に設定する方法を述べる。また, 明らかに道路でない抽出点をはずれ値として除外することで当てはめの精度を向上させる方法を述べる。NASMs はラインフィルタリングに従って航空画像の道路と正しく重ねあうように少しずつ変形する。最後に, 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。

Refining road maps from aerial images using adaptive parameter ASMs

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

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 use Network Active Shape Models(NASMs) to refine the road maps. The method can deform preseving the shape of the existing road maps and the connections of the road networks. Furthermore, we describe the way to determine the parameter of NASMs that controls a rigidness of shape automatically. Furthermore, we propose a method to fit more accurately by removing the outlier of the extracted non-salient road points. The NASMs deforms gradually towards matching the roads on the aerial image correctly according to the line filtering. Finally, the proposed method is validated by experimental tests using aerial images and existing road maps.

Key words Aerial imagery, Active shape models, Road extraction

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併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 17.5m 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。例えば、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。既存の地図を自動的に補正

する方法として、Klang は既存の道路地図を初期輪郭として Snakes [1] を用いている [2]。しかし、Snakes は自由に変形しすぎるため道路以外の雑音に非常に弱いという欠点がある。筆者らは、雑音に強く既存の数値地図の形状を保ったまま変形可能である Active Shape Models(ASMs) を用いて地図の補正を行ってきた [3]。また、従来手法の多くは道路の補正ステップをノード間の道路を単位で行っていたが、筆者らは、道路ネットワーク間の繋がりを保ったまま複数の道路をまとめて補正を行なう Network Active Shape Models(以下, NASMs) を提案してきた [4]。本論文では、これまで経験的に決定していた ASMs の初期形状をどれくらい保存するのかを調整するパラメータを自動的に設定する方法を述べる。また、抽出結果に悪影響を及ぼす明らかに道路ではない抽出点を、はずれ値として除外して形状テンプレートを当てはめることで、抽出精度の向上を図る方法について述べる。はずれ値は、ラインフィルタの

応答値により判別可能である。最後に、実際の航空画像と既存の数値地図を用いて実験を行ない、提案手法の有効性を示す。

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 $r(s) = (x(s), y(s))^T$ 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。

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

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。

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。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 Q を求めるには、

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

を計算すればよい。ここで、 $B(s)$ 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。

3. Active Shape Models [5], [6]

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なう。ASM は与えられた輪郭を、相似変換やアフィン変換に加え、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なうことができる。

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 $Q_0 \in S$ 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 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$ により、線形に表現することができる [6]。

$$Q = WX + Q_0 \quad (3)$$

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 0 & Q_0^x & 0 & 0 & Q_0^y \\ 0 & 1 & 0 & Q_0^y & Q_0^x & 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 $0 = (0, 0, \dots, 0)^T$ および $1 = (1, 1, \dots, 1)^T$ は N 次元ベクトルで、 Q_0^x および Q_0^y はそれぞれ、 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 $Q_f \in S$ をテンプレート Q_0 に当てはめることを考える。この際、大局的な Q_0 の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 $Q \in S$ を求めるために次の最小化

問題を考える。

$$\min_Q \{ \alpha (Q - Q_0)^T \bar{S} (Q - Q_0) + \|Q - Q_f\|^2 \} \quad (4)$$

ここで、 α は二つの誤差項を調整するパラメータである。この最小解は次式となる [6]。

$$\hat{Q} = (\bar{S} + U)^{-1} (\bar{S} Q_0 + U Q_f) \quad (5)$$

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

$$U = \begin{pmatrix} B & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix} \quad (6)$$

4. ASM の解析

本研究で用いる ASM は道路の抽出に適するよう改良している。本節では、それについて述べる。

4.1 ASM の解のパラメータ α による表現

S をスプライン空間、 S_s を Q_0 をアフィン変換した制御点を集めた空間だとすると、式 (5) は次のようになる (付録 A 参照)。

$$\hat{Q} = \frac{1}{1+\alpha} Q_f + \frac{\alpha}{1+\alpha} W W^+ Q_f \quad (7)$$

$$\equiv \beta Q_f + (1-\beta) \hat{Q}_f \quad (8)$$

ここで、 $\hat{Q}_f \equiv W W^+ Q_f$ 、 $\beta \equiv \frac{1}{1+\alpha}$ とする。つまり、ASM の解は抽出輪郭 Q_f と、抽出輪郭 Q_f に Q_0 を当てはめた輪郭 \hat{Q}_f との補間式で与えられる。

4.2 パラメータ α の設定方法

最終的に求める輪郭 \hat{Q} と、 \hat{Q} に対して形状テンプレートを当てはめた輪郭 $W W^+ \hat{Q}$ との平均二乗誤差がせいぜい L 以下なるように α を決定する方法を考える。

$$\|W W^+ \hat{Q} - \hat{Q}\|^2 \leq L \quad (9)$$

この条件を満たす最小の $\alpha (\geq 0)$ は次のようになる。

$$\alpha = \begin{cases} \sqrt{\frac{\|Q_f - \hat{Q}_f\|^2}{L}} - 1 & , \text{if } L \leq \|Q_f - \hat{Q}_f\|^2 \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

4.3 単独 ASM による更新ステップ

ASM を用いて道路を一本ずつ取り出して更新する場合の手続きは次のようになる。

STEP1 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形状テンプレート Q_0 とする。

STEP2 $r(s)$ 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_n の探索範囲を設ける。

STEP3 $\{r_n\}$ の各法線方向を軸にラインフィルタを画像にかけ、フィルタ応答値が最大となる点列 $\{r'_n\}$ を求める。その時の応答値を f_n とする。 r_n と r'_n を線形補間した中間点を $r''_n = r_n + \delta (r'_n - r_n)$ として計算する。ここで、 δ は $0 < \delta \leq 1$ の定数である。

STEP4 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。

STEP5 Q を式 (7) により得られる \hat{Q} で置き換える。

STEP6 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~STEP6 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。

STEP7 最終的に得られた \hat{Q} から B スプライン曲線を構成し、これを更新結果とする。

4.4 ラインフィルタリングによる道路探索

ここでは、STEP3 のラインフィルタリングについて述べる。ASM 们で画像処理を用いて 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傾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。

$$h(u) = \frac{1}{4w} \{H(u-3w) - H(u+3w)\} \quad (11)$$

$$- \frac{3}{4w} \{H(u-w) - H(u+w)\}$$

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 のガウス関数を畳み込んだフィルタを用いる。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。

4.5 フィルタ応答値によるはずれ値の検出

よりロバストに ASM 们を道路にマッチさせるために、明らかに道路ではないと考えられる抽出点を、はずれ値として除外する。具体的には、ラインフィルタの応答値によってはずれ値の判別を行なう。はずれ値を考慮した ASM 们の輪郭線の計算方法は次のようになる。

STEP 2.1 各探索点でのフィルタ応答値 f_n を B スプラインにより近似し、フィルタ応答値に関する制御点列 $F = (F_1, F_2, \dots, F_N)$ を得る。

STEP 2.2 F の閾値処理により、以下の重み行列 C を作成する。

$$C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_N, c_1, c_2, \dots, c_N),$$

$$c_n = \begin{cases} 1, & \text{if } F_n > F_{\text{thresh}} \\ \epsilon, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、 F_{thresh} は、はずれ値を判別する閾値である。 ϵ は 1 より小さな定数である。

STEP 2.3 上の重み行列 C を用いて、 \hat{Q}_f および \hat{Q} を次のように求める。すなわち、当てはめ輪郭線 \hat{Q}_f は、はずれ値を無視して計算される。また、最終的に求める輪郭線 \hat{Q} の、はずれ値に該当する部分は、テンプレートをそのまま当てはめた輪郭線 \hat{Q}_f をそのまま用いることにする。



- 抽出点
- はずれ値
- 初期輪郭線
- 探索範囲

図1 ラインフィルタにより検出した抽出点とはずれ値

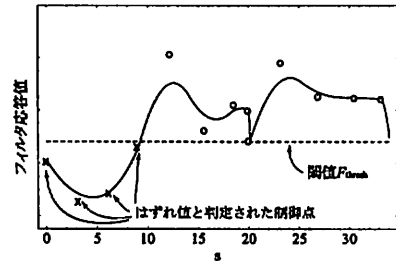


図2 各探索点でのラインフィルタの応答値

$$\hat{Q}_f = W(W^T C^T U C W)^{-1} W^T C^T U C Q_f$$

$$\hat{Q}^n = \begin{cases} \beta \hat{Q}_f^n + (1 - \beta) \hat{Q}_f^n, & \text{if } c_n = 1 \\ \hat{Q}_f^n, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ただし、右上の添字は制御点ベクトルの要素番号を表す。

図1に、ラインフィルタの最大応答値によって道路の抽出点と、はずれ値を検出した例を示す。図の右下の道路は影で覆われており、ラインフィルタは代わりに道路の表面色に似た建物を誤検出している。図2は、そのときの曲線パラメータ s に沿ったラインフィルタの応答値を B スプライン近似した結果である。道路を構成する各制御点は、この応答値に対して閾値処理をすることで、はずれ値かどうかを判別している。図3(a)の抽出輪郭線 Q_f に対して、はずれ値を考慮せずに ASM 们を適応した結果が図3(b)で、4.5節の処理により、はずれ値を除外して ASM 们を適応した結果が図3(c)である。はずれ値の悪影響により、図3(b)では抽出輪郭線の一部(同図の中央下の点線部分)が建物内に入り込み、同図右上の部分も少し右に傾いた結果になっているが、図3(c)では改善されることがわかる。

5. ネットワーク型 ASM 们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 们(以下、NASM 们)について述べる。基本的なアイデアは複数の道路を、不連続を許して一本の道路とみなすことで ASM 们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 们の変形を加える。各部分ネットワークは、一本の道路とみなしているため、単独 ASM 们の更新アルゴリズム STEP2 ~



(a) 求めた Q_f



(b) Q_f に当てはめた結果



(c) はずれ値を除外して当てはめた結果

図 3 はずれ値を除外した当てはめ結果

STEP5 を用いることが出来る。同様の処理を、全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一つ選択し、それに隣接する道路片を取り出し、これを部分ネットワークとする。

図 4 に、ネットワーク型 ASMs 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なうことになる。更新サイクルにより各制御

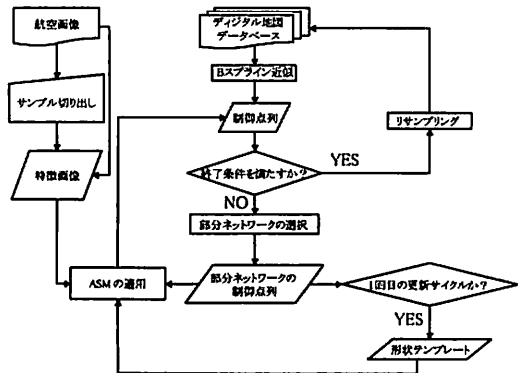


図 4 道路更新システム

点の更新を行なった後に、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。

6. 実験および検討

50cm 解像度の RGB カラー航空画像^(注1)およびに縮尺 1/25,000 の数値道路地図^(注2)を用いて実験を行なった。

図 5 で示す田舎の航空画像に対して、(a) 固定パラメータ $\beta = 0.1$ 、(b) 固定パラメータ $\beta = 0.9$ 、およびに (c) 提案手法による可変パラメータ法の比較を行なった。繰り返し更新回数はいずれも 30 回とし、提案手法では段階的に $L = 0.01$ から $L = 16.0$ までパラメータを緩和させながら更新を行なった。それぞれの最終結果を図 6 に示す。(a) 固定パラメータ $\beta = 0.1$ では、既存の数値地図をほぼアフィン変換した結果が得られたが、アフィン変換では完全にマッチしない箇所がいくつか見られた(図 7(a))。 (b) 固定パラメータ $\beta = 0.9$ では、B スプラインの自由な変形により、アフィン変換では完全にマッチしない箇所もうまく抽出することができた。しかし、同図の右上箇所で見られるように、ラインフィルタが失敗した箇所に大きく結果が引きずられてしまった。一方で、提案手法の (c) では各道路において適応的に異なるパラメータを用いることになり、ラインフィルタが失敗し抽出輪郭が乱れるような箇所では小さな β 値をとり、逆の場合には大きな β 値をとることで、両方の問題を解決することができた。図 7(b) は提案手法の結果の拡大図で、図 7(a) は固定パラメータ $\beta = 0.1$ の結果である。図 7(a) と比べ、正しく道路中心線を抽出できていることがわかる。

このことを定量的に評価するために、縮尺 1/2,500 の数値地図^(注3)と比較を行った結果を表 1 に示す。表より、提案手法が RMS 誤差で見ても優れていることが判った。

7. むすび

本論文では、既存の数値地図の形状とネットワーク間の繋がりを保ったまま変形可能な NASMs を用いて、既存の数値道路地図を航空画像にマッチングさせた。その際に、これまで経験

(注1)：デジタルアーステクノロジー社の画像である。

(注2)：国土地理院が発行する数値地図 25000 である。

(注3)：国土地理院が発行する数値地図 2500 である。

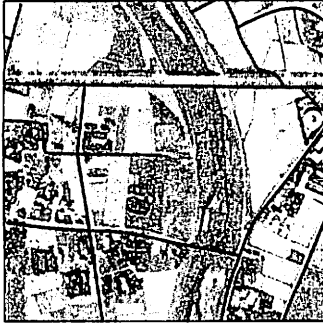


図5 入力画像と既存の数値地図

	RMS errors[m]
1/25,000 数値地図	6.37
固定パラメータ $\beta = 0.1$	3.03
固定パラメータ $\beta = 0.9$	5.72
提案手法による可変パラメータ	2.57

的に決められていた ASMs の形状をどの程度保存するのかを調整するパラメータを自動的に設定する方法を述べた。さらに、フィルタの応答値を閾値処理することで明らかに道路でない抽出点による悪影響を低減させる方法を提案した。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、提案手法が固定パラメータの場合に比べ少ない RMS で道路を抽出することができた。今後の課題として、はずれ値かどうかを判別する閾値 F_{thresh} を決定する方法を考える必要がある。

付 録

A.1 式 (7) の導出

WW^+ は 6 つのパラメータのアフィン空間上への射影行列であるので、その $P = I - WW^+$ も、またその補空間への射影行列となる。 Q_0 は W の列ベクトルに対して一次従属であるため、式 (5) の $\bar{S}Q_0$ は 0 となり消すことができる。式 (5) は次のように簡単にできる。

$$\begin{aligned}\hat{Q} &= (U(\alpha U^{-1}\bar{S} + I))^{-1}UQ_f \\ &= (\alpha U^{-1}\bar{S} + I)^{-1}Q_f \\ &= (\alpha P + I)^{-1}Q_f\end{aligned}$$

移項すると、

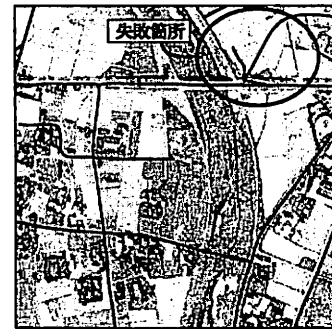
$$(\alpha P + I)\hat{Q} = Q_f$$

となる。 P は固有値 1 の射影行列であるので、 $P = \sum_i \varphi_i \varphi_i^T$ と固有値分解で表せる。 φ_i は固有ベクトルである。 P を代入すると、

$$(\alpha \sum_i \varphi_i \varphi_i^T + I)\hat{Q} = Q_f$$



(a) 固定: $\beta = 0.1$



(b) 固定: $\beta = 0.9$



(c) 提案手法: 可変 β

図6 各手法の比較結果

$$\alpha \sum_i \langle \varphi_i, \hat{Q} \rangle \varphi_i + \hat{Q} = Q_f \quad (\text{A-1})$$

ここで、 $\langle a, b \rangle$ はベクトル a, b の内積を表す。上式より、

$$\hat{Q} = Q_f - \alpha \sum_i \langle \varphi_i, \hat{Q} \rangle \varphi_i \quad (\text{A-2})$$

式 (A-1) の両辺を φ_n で内積をとり、 φ_i は正規直交ベクトルであることに注意すると、

$$\alpha \langle \varphi_n, \hat{Q} \rangle + \langle \varphi_n, \hat{Q} \rangle = \langle \varphi_n, Q_f \rangle$$



(a) 固定 $\beta = 0.1$ での結果



(b) 提案手法: 可変 β での結果

図 7 図 6(a), 図 6(c) の拡大図

$$(1 + \alpha) \langle \varphi_n, \hat{Q} \rangle = \langle \varphi_n, Q_f \rangle$$

$$\langle \varphi_n, \hat{Q} \rangle = \frac{1}{1 + \alpha} \langle \varphi_n, Q_f \rangle$$

これを式 (A.2) に代入すると,

$$\begin{aligned} \hat{Q} &= Q_f - \frac{\alpha}{1 + \alpha} \sum_i \langle \varphi_i, Q_f \rangle \varphi_i \\ &= Q_f - \frac{\alpha}{1 + \alpha} P Q_f \\ &= \frac{1}{1 + \alpha} Q_f + \frac{\alpha}{1 + \alpha} W W^+ Q_f \end{aligned} \quad (A.3)$$

以上により, 式 (7) が得られた.

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] Klang, D.: Automatic Detection of Changes in Road Databases Using Satellite Imagery, *Proc. of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 293-298 (1998).
- [3] 上瀧 剛, 内村圭一, 胡 振程: 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, 電子情報通信学会研究会技術研究報告, ITS2005-16, pp. 1-6 (2005).
- [4] 上瀧 剛, 内村圭一, 胡 振程: ネットワーク型 Active Shape Model による道路地図の更新と精度の検証, 電子情報通信学会研究会技術研究報告, ITS2005-116, pp. 37-42 (2006).
- [5] 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).
- [6] Blake, A. and Isard, M.: *Active Contours*, Springer (1998).