

## 交差点の検出に基づく航空画像からの道路の抽出

上瀧 剛† 内村 圭一† 脇阪 信治††

† 熊本大学工学部 〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1

†† 株式会社 ゼンリン 〒804-0003 北九州市戸畑区中原新町3-1

E-mail: †koutaki@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

あらまし 地理情報システム (GIS) において地図データの鮮度が重要な要素となり、より短いサイクルで地図更新作業を行うため計算機を用いて航空画像から自動的に道路地図を作成することが注目されている。この課題に対して様々な手法が提案されてきたがまだ実用の段階には至っていない。本稿では航空画像から道路ネットワークの構成要素である交差点を抽出し交差点同士を接続することで道路ネットワークを構築するトップダウン的な手法を提案する。道路の形状抽出には Snakes を用いる。郊外住宅地画像での抽出実験を行いその有用性を示す。

キーワード 道路抽出, 航空画像, 道路ネットワーク

## Road Extraction from Aerial Imagery based on Crossing Detection

Go KOUTAKI†, Keiichi UCHIMURA†, and Shinji WAKISAKA††

† Faculty of Engineering, Kumamoto University Kurokami 2-39-1, Kumamoto-city, Kumamoto, 860-8555 Japan

†† (C)ZENRIN, Tobataku Nakahara Shinmachi 3-1, Kita-Kyusyu City, Fukuoka, 804-0003 Japan

E-mail: †koutaki@st.cs.kumamoto-u.ac.jp

**Abstract** The freshness of map data is more important element in a Geographic Information Systems (GIS), and due to update of a map data in the shorter cycle, the automatic generation of a road map from an aerial imagery gets a lot of attention. Many reserches on this subject have reported different methods. However, an operational environment is still quite small. In this paper, we propose a method that generates road network from aerial imagery using a top-down approach. In the method, crossing is extracted, and road tracking method connects two crossing. For reconstructing the road shape, we use the method of "Snakes". Finally, we applied successfully to extract the road in the image of residential area in suburb.

**Key words** Road Extraction, Aerial Imagery, Road Network

### 1. ま え が き

地理情報システム (GIS) を利用したアプリケーションにとって地図データの鮮度が重要になってきている。より短いサイクルで地図更新作業を行うため、計算機を用いて航空機または人工衛星から撮影した写真から自動的に道路地図を作成することが期待されている。

この課題に取り組んできた研究としては、道路ネットワーク [7] を構成する要素間の関係を記述したモデルを導入し、入力画像から得られる個々の要素を組み立てることで全体の道路ネットワークを構築するボトムアップ的な手法を用いるものがある [6]。一方、ボトムアップ処理で抽出された要素同士の接続仮説を立て、検証を行うことでボトムアップ処理では抽出できなかった道路の推定を行うトップダウン処理とボト

ムアップ処理を連携させた手法がある [6]。抽出された要素同士の接続仮定には要素間の距離や方向を比較したり、道路追跡手法 [1] を用いる。

従来手法 [2], [4], [6] では、入力画像から輝度変化の大きなエッジ成分もしくは領域分割により得られる境界線から平行エッジを検出し、エッジで囲まれた領域の画素分布の均一性を調べることで道路ネットワークの構成要素である道路片を抽出していた。しかし、道路と背景の境界が曖昧だったり境界付近に影や植物が存在すると抽出は失敗する。さらに平行成分を持ちその内部の画素が均一である、という制約条件では道路以外の建物等を道路片として誤抽出しトップダウン処理における道路推定に悪影響を及ぼす危険がある。

本稿では、道路ネットワークの構成要素である交差点を入力画像からテンプレートマッチングにより直接抽出し、交差点同

士を道路追跡手法により接続することで道路ネットワークを構築する方法を提案する。この方法の利点は、交差点形状に似ている道路以外の地表物は少ないため建物等を誤抽出する可能性が少ないことである。幅情報を含めた道路の形状抽出には Ivan [2] と同様にリボン状の Snakes [3] を用いて抽出を行う。Snakes が道路以外の建物や白線のエッジに誤って収束するのを避けるために本手法では外部エネルギーを輝度のエッジ特徴ではなく、Snakes 内部の画素分布により与えられる領域エネルギー [8] を用いる。郊外住宅地画像での抽出実験を行いその有用性を示す。

## 2. 道路モデルの構築

本研究で扱う一般的道路はアスファルトまたはコンクリートで施設されている自動車用の道路である。対象とする地域は、図 1 に示すように都市部よりは建物の影や通行車両が少なく、田舎や農地よりも道路本数が多く複雑である郊外の住宅地とする。道路の区画線は高々一本で、道路舗装面の境界線は道路中心線と平行している道路を扱う。

### 2.1 道路表面色モデル

道路面は均一な色もつ領域が大部分を占める、という仮説により道路内の画素特徴はある平均ベクトル  $\mu$  のまわりに分散行列  $\Sigma$  の多次元正規分布に従うものとする。画素特徴は RGB のベクトルで表される。 $\theta = (\mu, \Sigma)$  を道路画素特徴分布と呼ぶことにする。 $\mu$  および  $\Sigma$  は地図作成者があらかじめ道路の教師画像を与えることにより設定される。今回のモデルは白線や標示領域を考慮していないが、道路内を占めるこれらの面積の割合は舗装面に比べて十分小さいので無視することができる。

### 2.2 道路ネットワークモデル

道路ネットワークとは図 2 に示すように道路の接続関係をグラフ構造により表現したものである。ネットワークは、交差点、曲がり角、行き止まり等の道路上の特徴点を表す道路ノードと、それらを結び道路の接続関係を表す道路リンクによって構成され、道路ノード間を結ぶ道路リンクを一本の道路と数える。図 3 に道路ネットワークモデルを示す。道路ネットワークを構成する要素についてそれぞれ説明する。

#### (a) 道路片

道路片は道路を構成する要素である。一般に道路リンクは車両、影、橋および植物等の障害物や交差点やカーブ等の影響に



図 1 対象道路の例

Fig. 1 An example image

より道路片に分断される。

#### (b) 交差点

ある点から放射状に向かって 3 本以上の道路リンクを持つものを交差点と定義する。T 字型道路では 3 本のうち 2 本の道路リンクは互いに 180 度異なる方向を持つ。つまり長い一本の道路リンクにもう一本の道路リンクが直角またはそれ以外の角度で接続する形となる。それぞれを主道路および分枝道路と呼ぶ。T 字型交差点を除く 3 本の道路リンクを持つ交差点は 3 叉路と呼び、4 本の道路リンクを持つものでそのうち 2 本の主道路からなるものを十字路と呼ぶ。

#### (c) 曲がり角

異なる方向を持つ 2 本の道路リンクの接続部分である。

#### (d) 行き止まり

他の道路リンクとの接続がない道路リンクの端点である。

## 3. 道路ネットワークの作成

Ivan [2] らは入力画像から平行エッジを検出し内部の画素の均一性を調べることで道路片を抽出し、道路片同士を繋ぎ合わせることで道路リンクを作成している。交差点は道路リンクを延長し互いに交差することを確認してから抽出される。

平行エッジを検出するためには直線エッジを検出する必要がある。

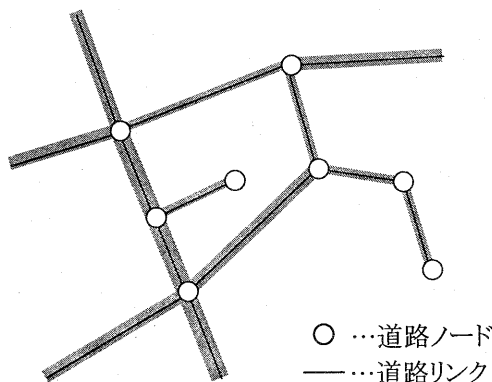


図 2 道路ネットワーク

Fig. 2 Road network

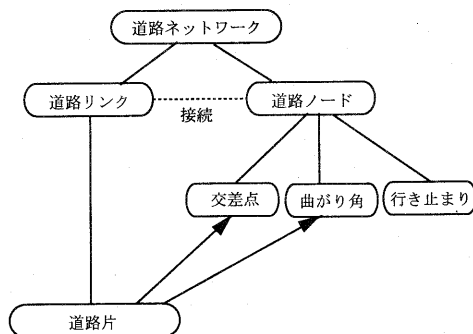


図 3 道路ネットワークモデル

Fig. 3 Road network model

あるが、道路と背景の境界が曖昧だったり境界付近に影や植物が存在すると検出は失敗する。この失敗は交差点の抽出の失敗の原因となる。このため建物の影が道路上に多く交差点も多い住宅街において、この方法は現実的でない。

このように従来手法では道路リンクの構築過程に交差点を検出していたが、本稿では入力画像に対してテンプレートマッチングにより直接交差点を抽出する方法を提案する。この方法には次の利点が挙げられる。

- (1) 道路ネットワークは交差点同士を結ぶことにより構築することができる。
- (2) 二つの交差点を選びその間を道路リンクが存在すると仮説を立て、検証することで道路リンクの推定を行うことができる。
- (3) 交差点に似ている建物は稀であるので建物を交差点として誤抽出することも少ない。

道路ネットワークの作成手順を以下に示す。

- STEP1** テンプレートマッチングによる交差点の検出
- STEP2** 道路追跡手法を用いて交差点同士の接続を確認
- STEP3** Snakes を用いて接続が確認された道路の形状を抽出し道路リンクを構築

### 3.1 交差点の抽出

#### 3.1.1 交差点テンプレートマッチング

交差点形状を模ったテンプレートを作成し画像に対してマッチングを行うことで交差点の抽出を図る。図4に三叉および四叉の交差点テンプレートの例を示す。交差点テンプレートは同図の  $(x_c, y_c)$  を中心座標とし、幅  $B_w$ 、長さ  $B_l$  の矩形を

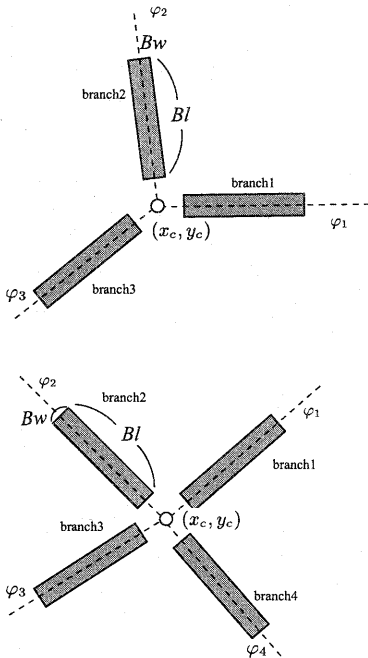


図4 三叉・四叉の交差点テンプレート

Fig. 4 Three or four-forked road template

$M$  個持つことで表現される。この矩形を分枝と呼ぶことにする。 $M$  個の分枝の方向角をそれぞれ  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$  として  $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M\}$  とすると、交差点の種類は  $\Phi$  により識別することができる。

$$\Phi + \eta \equiv \{\varphi_1 + \eta, \varphi_2 + \eta, \dots, \varphi_M + \eta\} \quad (1)$$

は交差点を角度  $\eta$  だけ回転させることを意味する。中心位置が  $(x_c, y_c)$  であり  $\Phi$  で特徴付けられ、角度  $\eta$  だけ回転した  $M$  又交差点の類似度  $D$  を次式で定義する。

$$D(\Phi + \eta, x_c, y_c) \equiv \begin{cases} \sum_{n=1}^M D'(\varphi_n + \eta, x_c, y_c) & \text{ただし,} \\ \min_{n=1, \dots, M} D'(\varphi_n + \eta, x_c, y_c) > \sigma_1 & \\ 0 & \text{; それ以外.} \end{cases} \quad (2)$$

ここで  $D'$  は  $n$  番目の分枝の類似度を表し、次式で定義する。

$$D'(\varphi, x_c, y_c) \equiv \frac{1}{|B_n|} \sum_{y \in B_n} p(y). \quad (3)$$

$B_n$  および  $y$  はそれぞれ位置  $(x_c, y_c)$  から  $\varphi$  方向を持つ分枝内部の画素集合および画素特徴ベクトルである。式(1)の条件は全ての分枝が少なくとも  $\sigma_1$  以上の類似度を持つことを要求している。 $p$  を次式に定義する。

$$p(y) = \begin{cases} 1 & \chi^2(y, \theta) < \sigma_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$\chi^2$  は次式に示すマハラノビス距離関数である。

$$\chi^2(y, \theta) = (y - \mu)^\top \Sigma^{-1} (y - \mu) \quad (5)$$

#### 3.1.2 相互相関画像の作成

あらかじめ数パターン of 交差点を作成し入力画像の全ての画素に対して交差点テンプレートマッチングを行う。入力画像の位置  $(x, y)$  に対して輝度値  $g(x, y)$  を

$$g(x, y) = \max_{\Phi \in C, 0 \leq \eta < 2\pi} D(\Phi + \eta, x, y), \quad (6)$$

により与える画像を作成する。本稿ではこの作成した画像を相互相関画像と呼ぶことにする。ここで  $C$  はあらかじめ作成した交差点パターンの集合である。

#### 3.1.3 相互相関画像から交差点の検出

相互相関画像の輝度値のピークに交差点が存在すると仮定し、そのピークの輝度値が閾値  $\sigma_3$  以上であれば交差点として抽出する。具体的には相互相関画像に対してガウシアンフィルタにより平滑化を行い、非極大抑制法によりピーク値をもつ画素を検出する。図5に入力画像から相互相関画像を作成し、交差点位置を検出した例を示す。

### 3.2 道路の追跡

抽出されたそれぞれの交差点の中心位置を開始位置、交差点の分岐方向を開始方向とする道路の追跡を行う。今ある  $M$  又交差点の中心位置を現在位置とする。交差点の  $M$  個の矩形のうち一つを取り出し、その方向角を  $\lambda_{\text{now}}$  とする。追跡は現

在位置から直進  $\lambda_{now}$ , 左進  $\lambda_{now} - \Delta\lambda$ , 右進  $\lambda_{now} + \Delta\lambda$  のいずれかの経路を選択し, その方向への現在位置移動を繰り返すことにより行われる. 選択の基準には交差点テンプレートマッチングで用いた類似度と同じものを用いる. 具体的には, 進行方向に対して矩形領域を作成し, その領域内の画素分布と道路特徴分布  $\theta$  との類似度を計算する. それから現在位置を最大類似度となる位置へ順次移動させていくことにより追跡が行われる. 次にその手順を述べる.

**STEP1** 現在の追跡位置を  $(x_{now}, y_{now})$ , 方向を  $\lambda_{now}$  とする. 直進・左進・右進の経路をそれぞれ

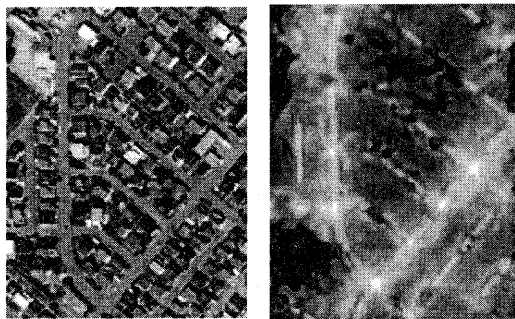
$$\begin{aligned} r_c &= (x_{now}, y_{now}, \lambda_{now}) \\ r_l &= (x_{now}, y_{now}, \lambda_{now} - \Delta\lambda) \\ r_r &= (x_{now}, y_{now}, \lambda_{now} + \Delta\lambda) \end{aligned}$$

とし, 経路集合  $A$  に追加する.  $\Delta\lambda$  は左進・右進と直進との方向角度の差である.

**STEP2**  $A$  の全ての要素

$$r_n = (x_n, y_n, \lambda_n), n = 1, 2, \dots, |A|$$

に対して位置  $(x_n, y_n)$  を始点とする方向  $\lambda_n$  で幅  $Sw$ , 長さ  $Sl$  の矩形を作成し, その中の画素集合を  $B_n$  とする. 式 (3) の右辺より道路画素特徴分布  $\theta$  との類似度を計算し, その中で最大類似度となる経路を  $r_{max} = (x_{max}, y_{max}, \lambda_{max})$  とする.



(a)入力画像 (b)相互相関画像



(c)交差点抽出結果

図5 相互相関画像からの交差点抽出例

Fig. 5 An example of crossing extraction from cross correlation image

**STEP3** 経路集合  $A$  から  $r_{max}$  を取り除き, 現在位置を  $(x_{max}, y_{max})$  から  $\lambda_{max}$  方向へ  $Sl$  進んだ個所へ移動する.

**STEP4** 最大類似度が閾値以下になるまで, 現在位置と他の交差点の分枝とぶつかる, もしくは所定の回数を超えるまで, STEP1~STEP3 を繰り返す.

以上のステップを全ての交差点が持つ分岐において実行する. 図6に追跡の概略図を示す.

### 3.3 Snakesを用いた道路形状抽出

道路形状の抽出には Ivan [2] らと同様に幅の要素を加えたりボン状の Snakes [3] を用いる. 道路輪郭線は次式で定義する  $N$  個の要素から構成される. これらの要素を以後制御点と呼ぶことにする.

$$v_i = (x_i, y_i, w_i), i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

ここで,  $x_i, y_i$  は  $i$  番目の制御点の位置,  $w_i$  は幅である.  $v_i$  における道路の左端および右端はそれぞれ道路中心線から法線方向に  $w_i$  離れた個所に位置する. 図7にその概略図を示す.

#### 3.3.1 動的計画法によるエネルギー最小化

Snakesのエネルギー最小化は Amini [5] が提案する動的計画法 (DP) による手法を用いる. 最終的な輪郭線は, 以下に示す輪郭線更新ステップを繰り返し, 所定の回数を超えるか, 制御点の移動が収束するまで, 反復することにより得られる.

**STEP 2.1** 輪郭を等間隔  $l$  で分割し, 制御点の座標をあたえる

**STEP 2.2** DP によりエネルギー最小となる制御点  $v_i (i =$

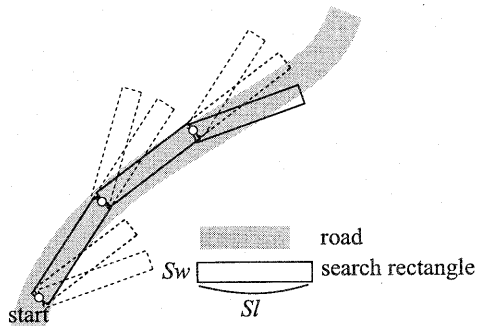


図6 道路の追跡

Fig. 6 Road tracking

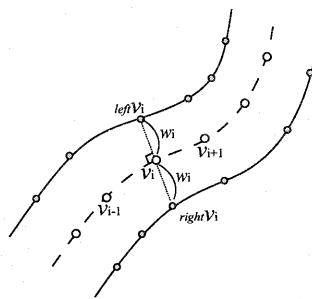


図7 道路輪郭線

Fig. 7 Road contour

1, 2, 3, ..., N) を計算する

### STEP 2.3 制御点列を線形補間しそれを抽出輪郭とする

STEP 2.1 の初期輪郭線は 3.3 で示した追跡結果を中心線とし、幅を 3 で固定したものとす。STEP 2.2 では各制御点の位置  $(x_i, y_i)$  および幅  $w_i$  を DP により決定する。制御点  $v_i$  の法線方向  $\mathbf{n}_i = (\Delta x_i, \Delta y_i)$  に局所座標をとり、制御点位置を  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i)$ ,  $(x_i - \Delta x_i, y_i - \Delta y_i)$  の三点のうちどれかに移動させながら  $w_i$  を決定する。 $\mathbf{n}_i$  の大きさは 1 画素相当に設定する。

#### 3.3.2 エネルギー関数

STEP 2.2 および STEP 2.3 における Snakes のエネルギーは次式で示される。

$$\begin{aligned} S_i(\mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i) = & \min_{\mathbf{v}_{i-1}} S_{i-1}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i-1}) \\ & + E_{\text{shrink}}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i-1}) \\ & + E_{\text{bend}}(\mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i-1}) \\ & + E_{\text{exp}}(\mathbf{v}_i) \\ & + E_{\text{region}}(\mathbf{v}_i) \\ & + E_{\text{edge}}(\mathbf{v}_i) \end{aligned} \quad (8)$$

$E_{\text{shrink}}$  および  $E_{\text{bend}}$  は内部エネルギー項  $E_{\text{int}}$  で、それぞれ輪郭の連結性および滑らかさの制約項である。 $E_{\text{exp}}$ ,  $E_{\text{region}}$  および  $E_{\text{edge}}$  は外部エネルギー項  $E_{\text{ext}}$  で、それぞれ道路を膨らませようとする膨張エネルギー、道路内の画素特徴による領域エネルギーおよびエッジエネルギーである。DP を用いて制御点  $\mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_i$  の組み合わせについて、最小エネルギーとなる  $\mathbf{v}_{i-1}$  のテーブルを作成し制御点を順次計算する。 $E_{\text{shrink}}$  および  $E_{\text{bend}}$  は次式で示される。

$$E_{\text{shrink}}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i-1}) = \alpha_i \frac{|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}|^2}{l^2} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{bend}}(\mathbf{v}_i + 1, \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{i-1}) & \quad (10) \\ = \beta_i \left| \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}}{|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}|} - \frac{\mathbf{v}_{i+1} - \mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_{i+1} - \mathbf{v}_i|} \right|^2 \end{aligned}$$

$E_{\text{shrink}}$  は伸び縮みによるエネルギーで固定間隔  $l$  により正規化されている。 $E_{\text{bend}}$  は曲げエネルギーであり曲率の二乗に比例している。 $\alpha_i, \beta_i$  はこれらを制御するパラメータである。外部エネルギー項の  $E_{\text{exp}}$  および  $E_{\text{region}}$  を次式に示す。

$$E_{\text{exp}}(\mathbf{v}_i) = -\gamma_i \frac{w_i - w_{\text{min}}}{w_{\text{max}} - w_{\text{min}}} \quad (11)$$

$$E_{\text{region}}(\mathbf{v}_i) = -\omega_i F(\mathcal{B}_i) \quad (12)$$

ここで、 $w_{\text{max}}, w_{\text{min}}$  は  $w_i$  のとり得る値の最大値および最小値である。 $F(\cdot)$  は次式で定義する類似度を示す関数である。

$$F(\mathcal{B}_i) = \frac{1}{|\mathcal{B}_i|} \sum_{\mathbf{y} \in \mathcal{B}_i} p(\mathbf{y}). \quad (13)$$

$\mathcal{B}_i$  は図 8 に示すように制御点  $v_i$  の中心まわりの幅  $2w_i$  長さ  $l$  で道路進行方向を向いた矩形内の画素集合である。 $\gamma_i, \omega_i$  はこれらを制御するパラメータである。 $D(\cdot)$  は式 (3) と同じもので

ある。続いてエッジエネルギー  $E_{\text{edge}}$  を説明する。実際の画像では、道路との境界まわりの画素濃度は建物の影や背景との混合により段階的に変化している場合がある。そこで図 8 に示すように  $E_{\text{region}}$  を計算していた矩形領域の両端にさらに  $Rw$  延長した矩形を作成し、その中の画素分布と道路画素特徴分布  $\theta$  との非類似度により  $E_{\text{edge}}$  を与える。 $E_{\text{edge}}$  を次式に示す。

$$E_{\text{edge}}(\mathbf{v}_i) = -\omega'_i F'(\mathcal{B}'_i) \quad (14)$$

ここで、 $\mathcal{B}'_i$  は延長した矩形領域内の画素集合である。 $F'(\cdot)$  は非類似度を示す関数で、

$$F'(\mathcal{B}'_i) = \frac{1}{|\mathcal{B}'_i|} \sum_{\mathbf{y} \in \mathcal{B}'_i} p'(\mathbf{y}), \quad (15)$$

$$p'(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \chi^2(\mathbf{y}, \theta) > \sigma_4 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

と定義する。 $\omega'_i$  は  $E_{\text{edge}}$  を制御するパラメータである。誤った境界に収束するのを避けるため、 $E_{\text{edge}}$  は  $E_{\text{region}}$  が十分低い制御点に限り有効とする。

## 4. 実験および考察

図 9 に示すような 1 画素あたり 1m の解像度をもつカラー航空画像に対して本手法を適応した。同図の画像の大きさは横 640 × 縦 480 である。図 9 から平行エッジを検出した結果の一部分を図 10 に示す。道路上の白線や建物の影の影響で道路の平行エッジが抽出されず道路以外の平行エッジも多数抽出している。この結果から交差点を推定することは困難であると予想される。テンプレートマッチングにより交差点を抽出した結果を図 11 に示す。提案手法では図 10 と同じ箇所において交差点を抽出することができた。道路ネットワークを作成した結果を図 12 に示す。ここで図の白丸は抽出した交差点で、白線は抽出した道路である。黒線は抽出できなかった道路で、黒点線は道路追跡はできているものの対応する交差点が見つからず抽出できなかった道路である。別画像でのネットワーク作成結果を図 13 に示す。図の左上と右上での道路ノード間の不自然な接

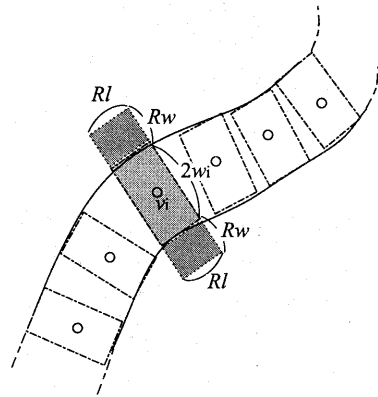


図 8 外部エネルギー計算領域  
Fig. 8 Energy calculation region

続は、この箇所に道路と同じ色を持つ駐車場があり、道路追跡の追跡方向が散漫になったためだと考えられる。Snakesにより道路形状を抽出した結果を図14に示す。未抽出および誤抽出がいくつか見られるが幅の広い道路に関しては、ほぼ抽出できており目的である道路の自動抽出は達成されたと言える。

問題点として、今回は交差点のテンプレートを3叉路、T字路、十字路の単純な3パターンしか用いておらず、このためこれ以外の多種複雑な交差点を抽出することができない。また、実際の交差点上では車両および横断歩道などの障害物が多く抽出が失敗する可能性が高い。

## 5. むすび

本稿では、航空画像からの道路抽出の自動化という課題に対して交差点を利用した道路ネットワークの構築方法について述べた。提案する入力画像からテンプレートマッチングを用いて交差点の抽出を行う手法は従来の道路片から交差点を推定する方法よりも直接的で、道路片の誤抽出および未抽出から生じる道路リンクの推定失敗の恐れがない。実験結果により、我々の提案した手法は道路情報の自動抽出に対して有効であることが示された。



図9 入力画像  
Fig. 9 An example image



(a)入力画像



(b)平行エッジ

図10 平行エッジの抽出結果  
Fig.10 Extracted parallel edges



図11 交差点の抽出結果  
Fig.11 Crossing extraction



図12 道路ネットワークの作成結果  
Fig.12 Extracted road network



図13 別画像での道路ネットワークの作成結果  
Fig.13 The other Extracted road network



図 14 道路抽出結果  
Fig.14 Extracted road

い道路ネットワークの構築を行う必要がある。

#### 文 献

- [1] Donald Geman, Bruno Jedyak: An Active Testing Model for Tracking Roads in Satellite Images, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.18, No.1, pp.1-14(1996).
- [2] Ivan Laptev, Helmut Mayer, Tony Lindeberg, Wolfgang Eckstein, Carsten Steger, Albert Baumgartner : Automatic extraction of roads from aerial images based on scale-space and snakes, Machine Vision and Applications, Vol.12, No.1, pp.23-31(2000).
- [3] Pascal.Fua and Y.G. Leclerc: Model Driven Edge Detection, Computer Vision, Vol.3, No.1, pp.45-56(1990).
- [4] A.Baumgartner and S.Hinz: Multi-Scale Road Extraction using Local and Global Grouping Criteria, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.33, Part B3/1, pp.58-65(2000).
- [5] Amini, Amir A.: Using Dynamic Programming for Solving Variational Problems in Vision, PAMI, Vol.12, no.9, pp.855-867(1990).
- [6] R.Ruskoné, S.Airault: Toward an Automatic Extraction of the Road Network by Local Interpretation of the Scene, In Photogrammetric Week, pp.147-157(1997)
- [7] 西嶋 正和, 渡邊 豊英: 道路情報自動抽出における未抽出道路の協調的推定法, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No.10, pp.1956-1965(1997)
- [8] 柴藤 稔, 白井 良明, 浅田 稔: クラスタリングから得られる領域の記述に基づく動的な輪郭抽出, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J75-D-II, No.7, pp.1111-1119(1992)