

動的輪郭モデルを用いた航空画像からの道路抽出の自動化

上 瀧 剛[†] 内 村 圭 一[†] 脇 阪 信 治^{††}

カラー航空画像から自動的に道路を抽出する方法を提案する。幅の要素をもったりボン状の動的輪郭モデルは道路形状を抽出する手段として有用であるが、初期輪郭線の決定法が問題である。本論文ではテンプレートマッチングにより交差点部分を検出し、検出された交差点に対して交差点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追跡を行い、それらの追跡結果を利用して動的輪郭モデルの初期輪郭線の作成を行う。安定した抽出を行うために、動的輪郭モデルの外部エネルギーは単純な輝度のエッジ特徴ではなく輪郭内部の画素分布と利用者が意図する画素分布との類似度により与える。郊外の住宅地画像で抽出実験を試み本手法の有用性を示す。

Automatic Road Extraction from Aerial Images Based on Active Contour Models

GO KOUTAKI,[†] KEIICHI UCHIMURA[†] and SHINGI WAKISAKA^{††}

In this paper, we propose the method of automatic road extraction from color aerial images. An active contour model with a width parameter is useful as a technique to extract the road form, but the method has a problem how to generate a initial contour. We use the template matching, and detect junctions. A road tracking is performed using the junctions' position and direction, and the initial contour of active contour model is constructed using the result of road tracking. As external energy, we use the distribution of pixel values instead of the simple edge feature so that it is possible to extract the road stably. Finally, we applied successfully to extract the road in the image of residential area in suburb.

1. ま え が き

地理情報システム (GIS) のためのデータ収集や更新の必要性により、デジタル画像から自動的に道路を抽出する方法が期待されている。これらの要求に対して、航空画像や衛星画像から自動的もしくは地図作成者との対話的なプロセスによって道路を抽出するさまざまな試みが行われている^{1)~4)}。

地図作成者との対話的に道路を抽出する代表的な方法として、地図作成者が与えた道路開始位置と開始方向から道路を追跡する方法がある¹⁾。また、道路形状を抽出する方法として動的輪郭モデル (Active Contour Model) を用いるものがある³⁾。この手法は輪郭を滑らかに拘束する内部エネルギーと画像特徴に従って働く外部エネルギーとの和で定義したエネルギー関数が最小となるように輪郭線を変形するもので、形状特徴と画像特徴を同時に扱うことができるという利点を持

つ。この場合、地図作成者は抽出したい道路近隣に初期輪郭線を設定する必要がある。

しかし、これらの対話的な方法ではまだ地図作成者への負担が大きく現実的ではない。すなわち追跡手法では開始位置と方向、動的輪郭モデルでは初期輪郭線を自動的に作成することが課題となる。初期輪郭線の自動作成化に関して Ivan²⁾ らは低解像度画像からエッジを抽出し、これらを初期輪郭線とした後にリボン状の動的輪郭モデルを作用させることにより農地航空画像からの道路抽出の自動化に成功しているが、道路以外の領域で多くのエッジが検出される複雑な住宅街などにおいてはこの方法を適用することは難しい。

これまでの動的輪郭モデルを用いた道路抽出の研究^{2)~4)}においては、外部エネルギーには輝度のエッジ特徴を用いているため、輪郭が近傍の強いエッジに誤って収束したり、外部エネルギーの勾配がないところでは望む位置に収束しない等の問題があった。また、滑らかさの拘束は交差点など不連続点において抽出誤りを引き起こす原因となる。

本論文では外部エネルギーを従来の単純な輝度のエッジ特徴ではなく領域の画素分布に基づいて作用さ

[†] 熊本大学
Kumamoto University
^{††} 株式会社ゼンリン
(C) ZENRIN

せる領域ベースの動的輪郭モデルを道路抽出に用いる．これによりエッジ成分が多く含まれる建物が多い画像の道路および細い道路でも安定した抽出が可能となる．さらに，膨大なエッジ情報から初期輪郭線を作成するのではなく，テンプレートマッチングにより交差点を検出しそれらの交差点から道路追跡を行うことで効率的な初期輪郭線の自動作成を図る．交差点を検出することにより道路追跡において不連続点の遭遇を避けることができる．

なお，既存の地図情報を併用した航空画像からの地表物抽出手法が提案されているが⁵⁾，この手法は新たな抽出というよりも，変更のあった建物の検出および位置あわせといった検査的な意味合いが強い．本論文では既存の地図情報を用いずに画像情報のみから道路を抽出することに焦点を当てる．

2. 道路モデルの構築

本論文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．これらに対して以下の仮説を用いる．

(1) 道路面は均一な色をもつ領域が大部分を占める

(2) 道路は線形でなだらかである

(3) 道路幅の変化は緩やかである

(1) の仮説により道路内の画素特徴，本論文ではカラー航空画像より得られる明度・色相・彩度の3つの値は，ある平均ベクトル μ のまわりに分散行列 Σ で多次元正規分布に従うものとし，道路の画素特徴分布を $\theta = (\mu, \Sigma)$ によりモデル化する．地図作成者が与える道路の教師画像から作成した画素特徴分布を θ' とし，以後画像内の道路との色の比較に用いる．道路線形モデルは次式で定義する 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．

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

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1にその概略図を示す．

3. 道路抽出の手順

道路抽出の自動化のためのこれまでの手法としては，低解像度画像のエッジ情報を用いるもの²⁾や，平行対となるエッジ成分を抽出しそれから初期輪郭線を作成するもの⁴⁾があるが，エッジ成分は道路に限らずさまざまな背景にも含まれるため道路を誤抽出する恐れがある．これに対し本論文では交差点が，

- (1) 特徴的な形状を持つ
 - (2) 道路は交差点間を結んで構成されている
- という性質に着目し，交差点の形状を持つものをテンプレートマッチングにより抽出し，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追跡を行う．それらの結果を利用して動的輪郭モデルの初期輪郭線を作成し，動的輪郭モデルを作用させ道路形状を抽出する．

3.1 交差点テンプレートマッチング

交差点を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2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 Bw ，長さ Bl の矩形を M 個持つことで表現される．矩形間の角度を $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M$ とする． M 叉

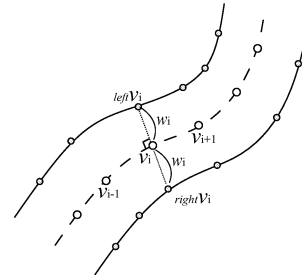


図1 道路線形モデル
Fig.1 Road alignment model

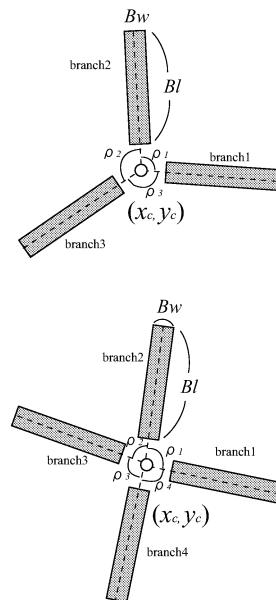


図2 三叉・四叉の交差点テンプレート
Fig.2 Three or four-forked road template

(DP) による手法を用いる．最終的な輪郭位置は，以下に示す輪郭位置更新ステップを繰り返し，所定の回数を越えるか，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 $v_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 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 の初期輪郭位置は 3.2 で示した追跡結果より得られる．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 $n_i = (\Delta x_i, \Delta y_i)$ 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． 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 における動的輪郭のエネルギーは次式で示される．

$$\begin{aligned} S_i(v_{i+1}, v_i) = & \min_{v_{i-1}} S_{i-1}(v_{i+1}, v_i) \\ & + E_{\text{shrink}}(v_i, v_{i-1}) \\ & + E_{\text{bend}}(v_{i+1}, v_i, v_{i-1}) \\ & + E_{\text{exp}}(v_i) \\ & + E_{\text{region}}(v_i) \\ & + E_{\text{edge}}(v_i) \end{aligned} \quad (6)$$

E_{shrink} および E_{bend} は内部エネルギー項 E_{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_{exp} ， E_{region} および E_{edge} は外部エネルギー項 E_{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，制御点は v_{i+1}, v_i の組み合わせについて，最小エネルギーとなる v_{i-1} のテーブルを作成し，順次計算される．

E_{shrink} および E_{bend} は次式で示される．

$$E_{\text{shrink}}(v_i, v_{i-1}) = \alpha_i \frac{|v_i - v_{i-1}|^2}{l^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{bend}}(v_{i+1}, v_i, v_{i-1}) \\ = \beta_i \left| \frac{v_i - v_{i-1}}{|v_i - v_{i-1}|} - \frac{v_{i+1} - v_i}{|v_{i+1} - v_i|} \right|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

E_{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_{bend} は曲げエネルギーであり曲率の二乗に比例している． α_i, β_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_{exp} および E_{region} を次式に

示す．

$$E_{\text{exp}}(v_i) = -\gamma_i \frac{w_i - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (9)$$

$$E_{\text{region}}(v_i) = -\omega_i D(B_i; \theta) \quad (10)$$

ここで， $w_{\max}, w_{\min}$ は w_i のとり得る値の最大値および最小値である． B_i は図 4 に示すように制御点 v_i の中心まわりの幅 $2w_i$ 長さ Rl で道路進行方向を向いた矩形内の画素集合である． γ_i, ω_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_{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 4 に示すように E_{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特徴分布 θ' との非類似度により E_{edge} を与える． E_{edge} を次式に示す．

$$E_{\text{edge}}(v_i) = -\omega'_i D'(B'_i; \theta) \quad (11)$$

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

$$D'(B'_i; \theta) = \frac{1}{|B'_i|} \sum_{y \in B'_i} p'(y) \quad (12)$$

$$p'(y) = \begin{cases} 1 & \chi^2(y; \theta) > \sigma' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

と定義する． ω'_i は E_{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_{edge} は E_{region} が十分低い制御点に限り有効とする．

動的輪郭はまず E_{region} により大域的に道路領域に収束し，その後 E_{edge} と E_{region} の作用により輪郭位置および幅を決定する．また，内部エネルギー項の E_{shrink} および E_{bend} により輪郭は滑らかな形状に拘束される．なお実際の初期輪郭線において，幅 w_i として最初小さい値を設定しておけば，その後 DP によ

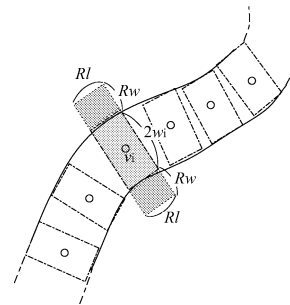


図 4 外部エネルギー計算領域
Fig. 4 Energy calculation region

交差点の中心からそれぞれ分岐した矩形領域内の画素特徴と道路特徴分布 θ' との類似度を比較し、ある閾値以上をもってマッチングしたものとみなす。類似度 D_{cross} を次式で定義する。

$$D_{\text{cross}} = \sum_{n=1}^M D(B_n; \theta) \quad (2)$$

ただし、

$$D(B_n; \theta) = \frac{1}{|B_n|} \sum_{y \in B_n} p(y). \quad (3)$$

ここで、 B_n , y はそれぞれ交差点中心位置から分岐した n 番目の矩形領域内の画素集合および画素特徴ベクトルである。 p を次式に定義する。

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

$\chi^2(y; \theta)$ は次式に示すマハラノビス距離関数である。

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

地図作成者はあらかじめ矩形間の角度 $\{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M\}$ が異なる交差点テンプレートを何種類か作成する。それらを画像に対してテンプレートを回転させながらマッチングを行い、その中でもっとも類似度の高い交差点の種類と中心位置と方向を抽出結果とする。二つの交差点の中心距離が Bl であるものが複数個抽出されれば、その中でもっとも類似度の高い交差点を抽出結果とする。

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 λ_{now} とする。追跡は現在位置から直進 λ_{now} 、左進 $\lambda_{\text{now}} - \Delta\lambda$ 、右進 $\lambda_{\text{now}} + \Delta\lambda$ 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 θ' 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。

STEP 1 現在の追跡位置を $(x_{\text{now}}, y_{\text{now}})$ 、方向を λ_{now} とする。直進・左進・右進の経路をそれぞれ

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

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。

STEP 2 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 λ_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) により道路特徴分布 θ' との類似度を計算し、その中で最大類似度となる経路を $r_{\text{max}} = (x_{\text{max}}, y_{\text{max}}, \lambda_{\text{max}})$ とする。

STEP 3 経路集合 A から r_{max} を取り除き、現在位置を $(x_{\text{max}}, y_{\text{max}})$ から λ_{max} 方向へ Sl 進んだ個所へ移動する。

STEP 4 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との中心距離が Bl 以下に達するまで、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 3 に追跡の概略図を示す。

3.3 動的輪郭モデルを用いた道路形状抽出

道路形状の抽出には Ivan²⁾ らと同様に幅の要素を加えたりボン状の動的輪郭モデルを用いる。Ivan らはさらに ziplock という手法も用いているが本論文でもこれを適用する。この手法は、動的輪郭の制御点を内部エネルギーのみに影響をうける passive part と内部および外部エネルギーの影響をうける active part との状態を切り替えることで道路追跡手法のような制御を行う方法である。ただし、本論文では初期輪郭位置には追跡で得られた結果を利用し、各制御点の外部エネルギーは単純な輝度のエッジ特徴ではなく制御点周辺の画素分布と道路特徴分布 θ' との類似度により与える。

3.3.1 動的計画法によるエネルギー最小化

動的輪郭モデルのエネルギー最小化のために Kass⁶⁾ らは変分法を用いて実現しているが、制約条件を組み込むのが難しいため Amini⁷⁾ が提案する動的計画法

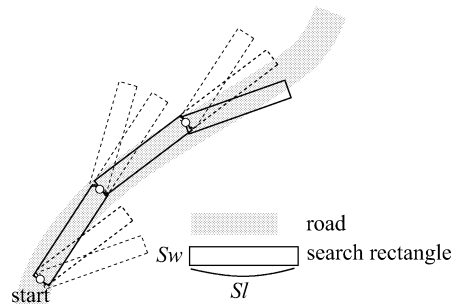


図 3 道路の追跡

Fig.3 Road tracking

り幅 w_i は E_{exp} と E_{region} および E_{edge} との兼ね合いにより決定される。

4. 実画像での実験および検討

ここで扱う画像はすべて RGB の 3 チャンネル, 8bit 階調, 1 画素あたり 50cm の解像度をもつカラー航空画像である。画素特徴としてはこれらに HSV 変換を施した, 明度・色相・彩度の三つの特徴ベクトルを用いる。

まず, 3.1 で述べたテンプレートマッチングによる交差点の抽出精度を調べるために図 5 を入力画像とする抽出実験を行った。交差点テンプレートは図 6 に示す 3 種類の三叉テンプレートを用いた。ここで交差点内の矩形間の角度は図 6 の左から, $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\} = \{120^\circ, 120^\circ, 120^\circ\}$, $\{90^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$, $\{60^\circ, 150^\circ, 150^\circ\}$ で, 矩形の大きさは全て $Bw = 6\text{pixel}$, $Bl = 32\text{pixel}$ である。図 7 に抽出結果を示す。図中の白い円で囲まれた箇所は抽出できなかった交差点である。17 箇所のうち 14 箇所の交差点を抽出し, 交差点ではない箇所を 2 箇所誤抽出した。

つぎに, 動的輪郭モデルの動作を検証するため一本の道路での抽出実験を行った。手動で図 8(a) の白線で示す初期輪郭線を与え動的輪郭モデルを作用させた結

果を図 8(d) に示す。図 8(b) および図 8(c) はそれぞれ STEP2.2 ~ STEP2.3 の計算を 20 回および 50 回繰り返した結果である。なお, 各エネルギーのパラメータは, $\alpha_i = 1.0$, $\beta_i = 2.0$, $\gamma_i = 4.0$, $\omega_i = \omega'_i = 2.0$, ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) とした。図 9 は途中で道路幅が変化したカーブ道路に対して動的輪郭モデルを作用させた結果である。このような道路に対しても道路境界は良好に表現されている。図 10 はその時の動的輪郭モデルのエネルギーの変化をグラフに示したもので, 約 50 回の反復計算で収束したことが分かる。

図 7 に対して 3.2 で述べた道路追跡を行い, その結



図 7 交差点の抽出結果

Fig. 7 Result of junctions' extraction



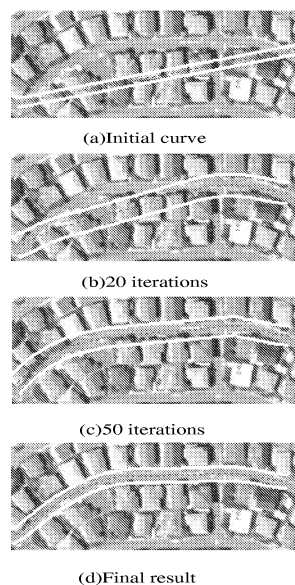
図 5 実験画像

Fig. 5 Example image



図 6 交差点テンプレート

Fig. 6 Junction template



(d)Final result

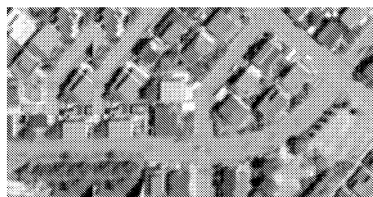
図 8 道路抽出結果

Fig. 8 Result of road extraction

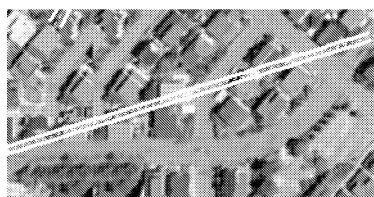
果を初期輪郭線とした動的輪郭モデルを作用させた結果を図 11 に示す．図中の白線および白点線はそれぞれ抽出した道路形状および道路中心線で，黒線および黒点線はそれぞれ抽出できなかった道路形状および道路中心線である．33 本の道路を含む郊外住宅地画像に対して 30 本の道路を自動的に抽出し，道路でない個所を 1 本誤抽出した．不連続点を明示することで交差点付近に現れる道路の不連続性も表現することができた．図 12 に別画像での道路抽出結果を示す．どちらの結果においても，(1) 交差点の未検出により数ヶ所の道路が抽出されていない，(2) それぞれの道路を独立に抽出しているために抽出された道路間のつながり目が不自然である，などの問題点が挙げられるが本論文の目的である道路抽出の自動化は達成されている．

5. む す び

本論文では，カラー航空画像からの道路形状の抽出にリボン状の動的輪郭モデルを用いた．交差点形状を模ったテンプレート画像にマッチングさせて交差点部分を検出し，そこから追跡を行うことで動的輪郭モデルの初期輪郭線の作成し，道路抽出の自動化を図った．



(a)Example image



(b)Initial curve



(c)Final result

図 9 幅が変化する道路の抽出

Fig. 9 Result of road extraction with variable width

動的輪郭モデルの外部エネルギーには単純な輝度のエッジ特徴ではなく，輪郭内部の画素分布と利用者が意図する画素分布との類似度により与える領域ベースの動的輪郭モデルを用いることで安定な抽出を図った．

郊外住宅地画像へ適応した結果，多くの道路を自動的に抽出することができた．また，不連続点を明示することで交差点付近に現れる道路の不連続性も表現することができた．

道路の抽出結果は交差点の抽出結果に依存しているために交差点抽出のさらなる精度向上が求められる．今回は一本一本の道路を独立に抽出したが道路間の連結性を考慮する必要がある．また，人の目から見てより自然であるように道路形状を整形することなどが今後の課題である．

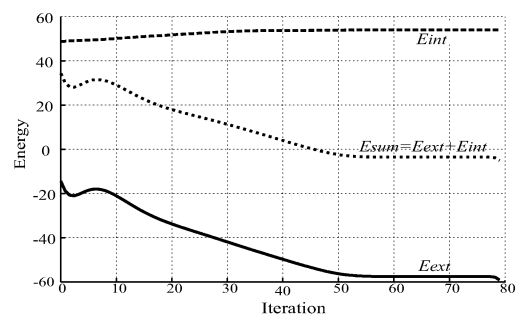


図 10 エネルギーの推移

Fig. 10 Energy transition

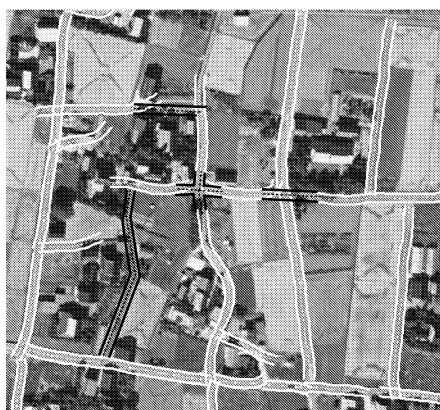


図 11 道路抽出結果

Fig. 11 Result of road extraction



(a) Example image



(c) Final result

图 12 道路抽出結果

Fig.12 Result of road extraction

参 考 文 献

- 1) Donald Geman, Bruno Jedynak: 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) Niederost: Automated Update of Building Information in Maps Using Medium-Scale Imagery, Ascona01, pp.161-170(2001).
- 6) Michael Kass, Andrew Witkin, and Demetri Terzopoulos: Snakes: Active contour models, Computer Vision, Vol.1, No.4, pp.321-331(1988).
- 7) Amini, Amir A.: Using Dynamic Programming for Solving Variational Problems in Vision, PAMI, vol.12, no.9, pp.855-867(1990).