

4本 snake による道路両端白線の両エッジ追跡の検討

澤野 弘明^{†,††} 岡田 稔[†]

本論文では動的輪郭モデル snake により道路シーンから道路両端白線の両エッジを追跡する一手法を提案する．道路両端に道路白線が存在すると仮定し，それらに対にしたときにそれぞれの道路白線に対して内側と外側の物理的なエッジが合計 4 本存在する．これらは画像の輝度値を一階偏微分した結果に現れる正と負のピークに対応する．そこで追跡対象別にピークの符号と一階偏微分の方向を考慮した画像エネルギーを用いる．消失線付近の制御点の拘束条件，snake の交差禁止処理により，4本の snake で 4 本のエッジを同時に追跡する．三次元 CG と実写の道路シーンの動画像における実験により本手法の有効性を示す．

Tracking Edges of Road White Lines by Four Snakes

HIROAKI SAWANO^{†,††} and MINORU OKADA[†]

In this paper we propose a method for tracking edges of road white lines in a video by an active contour model, snake. We assume that there are road white lines of both sides, totally four physical edges of inner and outer exist since they are paired. The four edges are selectively and simultaneously tracked for its targets with constraint of control points around the vanishing line and snake cross prohibition. Experimental results indicate the availability of the proposed method with CG and actual road scenes.

1. はじめに

円滑な道路案内を目的としてカーナビゲーションシステム（以下，カーナビ）に三次元コンピュータグラフィクス（3D-CG: three-dimensional computer graphics）が使用されている．しかし，実際の風景を模擬するための詳細なモデリングデータを作成することは容易ではなく，大きな人的，予算的コストが要求される．そこで筆者らは拡張現実感（AR: augmented reality）表示技術を利用した次世代カーナビ¹⁾の開発を進めている．ここでは AR 表示の基礎として道路エッジ追跡が必要である．道路エッジ追跡に関する研究はすでにいくつか報告されている．代表的な戦略としてテンプレートマッチング²⁾や Hough 変換³⁾などを使用した研究があげられる．しかし，これらは用意された形状に依存するため，複雑な形状の道路に対

応することが困難である．一方，動的輪郭抽出モデル（snake: active contour model）⁴⁾による道路エッジ追跡では道路に関する様々な知識をエネルギーとして定義して扱うことができるため，柔軟な応用が期待できる．Snake を用いた道路エッジ追跡法として，八木らは道路の平行性を拘束条件とする手法⁵⁾，Wang らは B-Spline を利用した手法⁶⁾，また Sawano らは道路形状の微分特徴および慣性を考慮した手法⁷⁾を提案した．本研究では Sawano らによる手法⁷⁾（以下，従来手法）を基本戦略として使用し，カーナビで使用される入力情報を snake の拘束条件として利用することを想定している．

一般的な道路シーンには，白線，歩道と車道用道路の境界など，様々なエッジが存在する．道路白線は車道用道路領域に対して輝度値が高いため，本研究では道路エッジとして道路白線に着目する．特に直線道路を追跡対象とし，カーブなどのトポロジ的に直線と等価な道路も対象とする．さて，図 1 に示すように道路両端を対にしたとき，道路白線には内側と外側の物理的なエッジが合計 4 本存在する．本論文では複数の snake により，4 本のエッジを選択的かつ同時に追跡するための手法を提案する．画像の輝度値の一階偏微

† 早稲田大学大学院情報生産システム研究科

Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

†† 日本学術振興会特別研究員

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

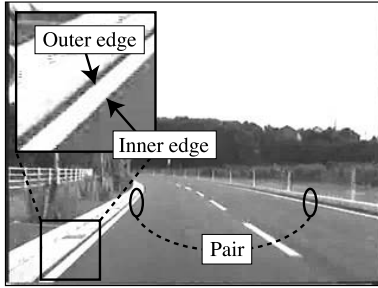


図 1 道路白線の内側と外側のエッジ

Fig. 1 Inner and outer edges of road white lines.

分の方向とピークの符号を考慮した画像エネルギー、消失線付近の制御点の拘束条件、snake 間の交差禁止処理による収束点の決定法を提案する。それぞれの snake の相互作用により、エッジの追跡精度の向上が期待される。そして三次元 CG 動画像を用いた道路白線追跡実験で提案手法の有効性を示し、実写動画像を用いた実験により今後の課題をあげる。関連研究と提案手法はそれぞれが要素技術であり、併用することで追跡精度やノイズなどに対するロバスト性の向上が期待される。

2. 道路追跡のための snake

2.1 従来手法

従来手法⁷⁾では、 m 個の制御点を持つ、 n 本中 i 番目の snake S_i ($0 \leq i \leq n-1$) における制御点のベクトル表現は $v_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j})$ ($0 \leq j \leq m-1$) として定義される。道路両端のエッジ追跡のために $n = 2$ 本の開曲線 snake を利用し、2 種類の制御点（主制御点、副制御点）を用いている。主制御点は消失線付近を移動するものと画像端上を移動するものの 2 種類があり、大まかな道路形状を追跡し、副制御点は主制御点の影響を受けながら道路エッジを追跡する。従来手法の画像エネルギー E_{image} を式 (1) に示す。

$$E_{\text{image}}(v_{i,j}) = -w_{\text{image}} G_{\sigma} |\nabla I(v_{i,j})| \quad (1)$$

ここで、 w_{image} 、 G_{σ} 、 ∇ 、 I は、それぞれ重み係数、標準偏差 σ によるガウシアン演算子、グラジエント演算子および画像の輝度値である。式 (1) では複数のエッジを区別しておらず、輝度値のピークが G_{σ} により相互に影響するため、幅を持つ道路白線のエッジではなく、エッジ間を不安定に追跡するという問題点があった。

2.2 エッジの符号

幅を持つ道路白線が存在する画像の輝度値を一階偏微分すると、白線の内側と外側の物理的なエッジの位置に正か負のピークが現れる。そこでこれらのピーク

の符号を利用することで、白線の両端のエッジを選択的に追跡することが可能になる。この目的には横方向のみの一階偏微分による簡易的な手法が考えられるが、道路シーンの遠方のカーブなどでは横方向のベクトル勾配が小さいという問題があげられる。そこで本研究における画像エネルギーの計算に、横 ($D_x = \frac{\partial}{\partial x}$) と縦 ($D_y = \frac{\partial}{\partial y}$) の両方向の一階偏微分を利用する。正と負、横と縦の組合せに対応させた画像エネルギー E_{x+} 、 E_{x-} 、 E_{y+} 、 E_{y-} を式 (2) ~ (5) に示す。

$$E_{x+}(v_{i,j}) = \begin{cases} -w_{\text{image}} G_{\sigma} D_x I(v_{i,j}) & : D_x I(v_{i,j}) \geq 0 \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$E_{x-}(v_{i,j}) = \begin{cases} w_{\text{image}} G_{\sigma} D_x I(v_{i,j}) & : D_x I(v_{i,j}) \leq 0 \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{y+}(v_{i,j}) = \begin{cases} -w_{\text{image}} G_{\sigma} D_y I(v_{i,j}) & : D_y I(v_{i,j}) \geq 0 \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{y-}(v_{i,j}) = \begin{cases} w_{\text{image}} G_{\sigma} D_y I(v_{i,j}) & : D_y I(v_{i,j}) \leq 0 \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

これらのエネルギーはエッジの位置関係と、画像平面上の制御点 $v_{i,j-1}$ 、 $v_{i,j}$ による線分と x 軸のなす $v_{i,j}$ 中心の反時計回りの角度により選択される⁸⁾。なお従来手法では画像エネルギーの計算の際に、ガウシアン操作を画像全体に施していた。これに対して評価実験では、提案手法と従来手法の双方で、処理時間の削減のために、制御点の探索範囲のみガウシアン操作をする。

2.3 消失線付近の主制御点の拘束条件

消失線付近を移動する主制御点は、本来、消失点に対応することが望ましい。そこで本論文では n 本の snake の消失点付近の主制御点を統一し、かつ副制御点が追跡した道路形状の延長線上に主制御点が存在するための拘束条件を検討する。主制御点の内部エネルギーは、主制御点から近い左右のそれぞれ 3 個ずつの副制御点を用いて求める。主制御点 v'_M と近隣の副制御点の関係を図 2 に示す。Snake のそれぞれの制御点からなる隣接線分の外角が一定になるようなエネルギー関数 $E_{\text{int},V}(v'_M)$ を式 (6) のように定義する。

$$E_{\text{int},V}(v'_M) = \sum_{i=0}^{n-1} |\theta(v'_{i,1}) - \theta(v'_{i,2})| \quad (6)$$

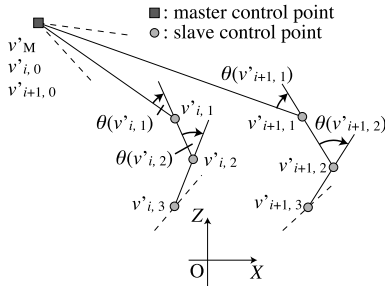


図 2 上面図における両側のセグメント間の外角

Fig. 2 External angles between two segments of two sides in top view.

$$\theta(v'_{u,v}) = \arctan(v'_{u,v} - v'_{u,v+1}) - \arctan(v'_{u,v-1} - v'_{u,v})$$

$$\arctan(v'_{u,v}) = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{Z_{u,v}}{X_{u,v}} & : 0 \leq X_{u,v} \\ \tan^{-1} \frac{Z_{u,v}}{X_{u,v}} + \pi & : \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで画像平面上的の制御点 $v_{i,j}$ を三次元道路平面に投影した制御点を $v'_{i,j} = (X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j})$ として表す。また、 $v'_M = v'_{i,0}, \forall_i$ である。

2.4 Snake 間の交差禁止処理による収束点の決定
道路白線とそのエッジ間には以下の関係を仮定し、snake 間が交差しないように制御点を収束させる。

- 直線道路両端の白線は交差しない。
- 白線の内側と外側のエッジは交差しない。

Snake 間の交差禁止処理を利用した収束点決定のアルゴリズムを図 3 に示す。まず、 $v_{i,j}$ の p 近傍内の探索範囲 $a_l = (x_l, y_l)$ ($0 \leq l \leq p$)、 $a_0 = (0, 0)$ による $v_{i,j} + a_l$ と隣接制御点 $v_{i,j+1}$ による線分と、 S_i と異なる snake S_k ($0 \leq k \leq n-1, k \neq i$) のすべての隣接制御点間の線分の交差判定をする (図 3 の logical function CrossCheck)。注目線分間が交差せず、かつエネルギー (図 3 の E 関数) が最小となる位置に $v_{i,j}$ を移動させる。これを snake 間の交差禁止処理とする (図 3 の procedure CrossProhibition)。また画像端を移動する主制御点 $v_{i,m-1}$ の場合は、 $v_{i,m-1} + a_l$ と $v_{i,m-2}$ による線分の交差禁止処理をする。一方、消失線付近の主制御点 $v_{i,0}$ は、前節の拘束条件により $v_{i,0} = v_{k,0}$ である。そのため $v_{i,0} + a_l$ と $v_{i,1}$ による線分は、他の線分と交差しているため、 $v_{k,0}$ を一端とする線分との交差判定はスキップし、 $v_{i,0}$ を移動させる (図 3 の procedure MoveMasterControlPoint)。これらの処理をすべての snake $S_{\text{root}} = \{S_0, \dots, S_{n-1}\}$ が収束条件を満たす (図 3 の function Condition) まで続ける (図 3 の procedure Convergence)。ここで初期フレームにおいて、消失線付近の主制御点とその

```

logical function CrossCheck( $v_1 = (x_1, y_1), v_2 = (x_2, y_2)$ ,
 $S_k = \{v_{k,0} = (x_{k,0}, y_{k,0}), \dots, v_{k,m-1} = (x_{k,m-1}, y_{k,m-1})\}$ )
for  $h \leftarrow 0$  to  $m-2$  do begin
  if  $x_1 \geq x_2$  then
    if  $((x_1 < x_{k,h}$  and  $x_1 < x_{k,h+1})$  or
       $(x_2 > x_{k,h}$  and  $x_2 > x_{k,h+1}))$  then return false
  else
    if  $((x_2 < x_{k,h}$  and  $x_2 < x_{k,h+1})$  or
       $(x_1 > x_{k,h}$  and  $x_1 > x_{k,h+1}))$  then return false
  end if
  if  $y_1 \geq y_2$  then
    if  $((y_1 < y_{k,h}$  and  $y_1 < y_{k,h+1})$  or
       $(y_2 > y_{k,h}$  and  $y_2 > y_{k,h+1}))$  then return false
  else
    if  $((y_2 < y_{k,h}$  and  $y_2 < y_{k,h+1})$  or
       $(y_1 > y_{k,h}$  and  $y_1 > y_{k,h+1}))$  then return false
  end if
  if  $((x_1 - x_2)(y_{k,h} - y_1) + (y_1 - y_2)(x_1 - x_{k,h}))$ 
     $((x_1 - x_2)(y_{k,h+1} - y_1) + (y_1 - y_2)(x_1 - x_{k,h+1})) > 0$ 
  then
    if  $((x_{k,h} - x_{k,h+1})(y_1 - y_{k,h}) + (y_{k,h} - y_{k,h+1})(x_{k,h} - x_1))$ 
       $((x_{k,h} - x_{k,h+1})(y_2 - y_{k,h}) + (y_{k,h} - y_{k,h+1})(x_{k,h} - x_2)) > 0$ 
    then return false
  end if
end for
return true
end function

```

```

procedure CrossProhibition( $v_1, v_2, S_i, S_{\text{root}} = \{S_0, \dots, S_{n-1}\}$ )
for  $l \leftarrow 0$  to  $p$  do begin
  flag ← true,  $s \leftarrow 0$ 
  for  $k \leftarrow 0$  to  $n-1$  do begin
    if  $((S_i = S_k)$  or  $(\text{true} = \text{CrossCheck}(v_1 + a_l, v_2, S_k)))$ 
      then flag ← false, break
    end for
  if (flag=true) then
     $q \leftarrow E(v_1 + a_l)$ 
    if  $((t = \text{NULL})$  or  $(t > q))$  then  $t \leftarrow q, s \leftarrow l$ 
  end if
end for
 $v_1 \leftarrow v_1 + a_s$ 
end procedure

```

```

procedure Convergence ( $S_{\text{root}} = \{S_0 = \{v_{0,0}, \dots, v_{0,m-1}\}, \dots, S_{n-1} = \{v_{n-1,0}, \dots, v_{n-1,m-1}\}\}$ )
do begin
  for  $i \leftarrow 0$  to  $n-1$  do begin
    CrossProhibition( $v_{i,m-1}, v_{i,m-2}, S_i, S_{\text{root}}$ )
    for  $k \leftarrow m-2$  to 1 do begin
      CrossProhibition( $v_{i,j}, v_{i,j+1}, S_i, S_{\text{root}}$ )
    end for
    MoveMasterControlPoint ( $v_{i,0}$ )
  end for
  while Condition( $S_{\text{root}}$ )=false
end procedure

```

図 3 Snake 間の交差禁止処理を利用した収束点決定

Fig. 3 Cross prohibition between snakes and convergence.

隣接制御点による線分以外は交差しないように配置しておく。

3. 実験と評価

3.1 三次元 CG 動画によるファントム実験

まず提案手法の基本的な有効性を検証するために、明瞭な白線が存在し、周辺車輛や木などのノイズを含まない三次元 CG 動画を用いたファントム実験を行う。三次元 CG 動画の作成には POV-Ray⁹⁾ を用いた。画像サイズは 640×480 [pixel] である。実験には

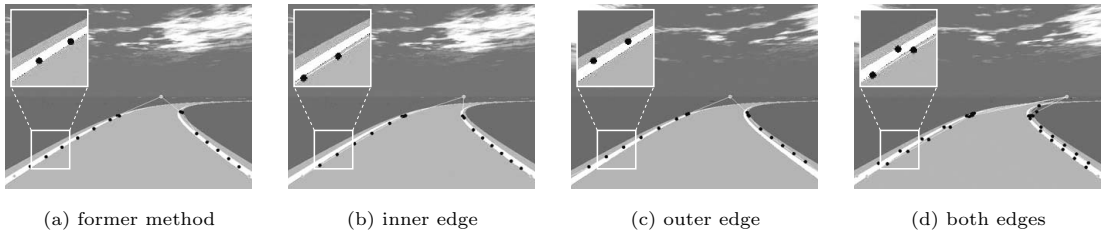


図 4 ファントム 3D-CG 動画像を用いた従来手法と提案手法による実験結果 (動画像の一部)
 Fig. 4 Experimental results by the former and proposed methods with a phantom 3D-CG video (a frame in the video).

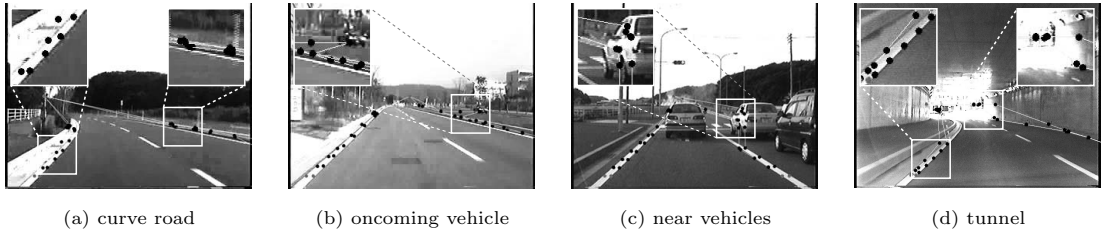


図 5 実写動画像を用いた提案手法による実験結果 (動画像の一部)
 Fig. 5 Experimental results by the proposed method with actual road videos (a frame in the video).

表 1 従来手法とのエッジ追跡結果の比較

Table 1 Comparison of the result of tracking edges with the former method.

(a) 3D-CG road scene (Fig. 4)

	\overline{E}_{in}	\overline{E}_{out}	\overline{fps}
former method	6.70	5.22	3.389
proposed method (inner)	<u>4.21</u>	—	3.090
proposed method (outer)	—	4.30	<u>4.046</u>
proposed method (both edges)	4.70	—	1.824
	—	3.02	

E_{in}, E_{out} : Convergence error (inner, outer)
 fps: Frame rate

(b) Actual road scene (Fig. 5(a))

	\overline{E}_{in}	\overline{E}_{out}	\overline{fps}
former method	15.16	<u>10.74</u>	<u>1.790</u>
proposed method (inner)	<u>11.85</u>	—	1.562
proposed method (outer)	—	13.43	1.672
proposed method (both edges)	15.84	—	0.810
	—	13.67	

RedHat Linux +gcc, Athlon MP 2200+ dual 環境で行い, G_σ のサイズは 51×51 [pixel], $\sigma = 17$ [pixel] とした. 初期フレームの制御点の初期位置は, 目視による真値より約 30 [pixel] 内側とする. 各 snake の制御点数を $m = 10$, 縦横がそれぞれ $[-5, 5]$ の $p = 120$ 近傍の探索範囲を用いた. 収束条件はすべての制御点の移動距離の平均値が 1 [pixel] 以下になったときとした.

従来手法 ($n = 2$) による白線追跡結果と, 提案手

法による内側 ($n = 2$) と外側 ($n = 2$), 両エッジ ($n = 4$) の追跡結果を図 4 に示す. 実験結果を澤野らによる評価方法⁸⁾を用いて, 内側と外側の収束誤差 E_{in}, E_{out} および 1 秒間のフレーム数 fps を定量評価する. 各 4 フレームの平均, $\overline{E}_{in}, \overline{E}_{out}, \overline{fps}$ による, 各実験方法に対する評価を表 1 (a) にまとめる. それぞれの評価項目において最も良好な結果にアンダーラインを引いた. 表 1 (a) より, 収束誤差 $\overline{E}_{in}, \overline{E}_{out}$ において, 提案手法の有効性が従来手法に比べ顕著に示された. これは従来手法による追跡結果では 2.1 節で示したように, 道路白線の内側と外側のエッジ間を不安定に追跡し, 収束誤差が大きくなっていったためである. 一方, 従来手法と提案手法で内側と外側のどちらかのエッジのみを追跡する場合には, 処理時間に大きな差はないが, 両エッジを同時に追跡する場合, 2 倍の処理時間を費やした. 本実験では 2.2 節で示したように制御点の探索範囲のみガウシアン操作しており, 処理全体に対してガウシアン操作に要する処理時間は平均 92.7%を占めている. これにより両エッジを同時に追跡した結果では, 制御点数が 2 倍に増えたため処理時間も約 2 倍となった.

3.2 実写動画像による実験

時速 50 [km/h] で走行中に撮影した実写動画像に対して道路白線追跡実験を行う. そのほかの実験環境はファントム実験と同一とする. 提案手法による道路両端白線の両エッジ追跡結果を図 5 に示す. また従来手

法との比較として、道路エッジが死角に存在していない、図 5 (a) の動画の 4 フレームの平均を表 1 (b) に示す。表 1 (b) では、従来手法の外側のエッジ追跡精度が最も高いことが確認された。これは白線と路側帯の間隔が狭く、かつ白線と路側帯のほぼ中心に白線の外側のエッジが存在したためであると考えられる。実写動画像に対するロバスト性の向上は今後の課題である。処理時間における相対評価では、表 1 (a) と同様の傾向が確認された。実験結果から得られた提案手法の問題点とその対応策を以下にあげる。

(a) カーブ道路 (図 5 (a)) ガウシアン操作による周辺のエッジの影響により遠方の道路形状を追跡できていない。本実験では G_σ のサイズおよび σ を固定で扱ったが、カメラの原点と制御点との距離によって G_σ のサイズと σ を可変とする必要がある。

(b) 対向車輛が存在するシーン (図 5 (b)) 制御点のひとつが対向車輛のエッジを追跡している。白線の幅一定に対応する拘束条件を用いて対策する。

(c) 交差点手前に車輛が存在するシーン (図 5 (c)) 道路右側の 2 本の snake が車輛のエッジを追跡している。上記で述べた白線の幅以外に道路幅一定という拘束条件によりロバスト性を向上させる。また周辺車輛の影響としてエッジの遮蔽が考えられる¹⁾。カーナビに使用される地図情報を snake の拘束条件として利用することで、死角に存在するエッジに対応する。

(d) トンネル (図 5 (d)) トンネルの出入り口付近では照明の変化が大きく、ロバストに追跡できていない。ダイナミックレンジの改善などの対策が必要である。またトンネル内もしくは夜間において、白線の追跡が難しい場合は赤外線カメラの利用も検討する。

4. おわりに

本論文では、道路両端白線の内側と外側の物理的なエッジを選択的かつ同時に追跡する手法を提案した。画像の輝度値を一階偏微分したときに現れる正と負のピークについて横と縦の両方向を考慮した 4 個の画像エネルギーを、追跡対象別に使用することにより選択的にエッジを追跡することができた。道路両端白線の両エッジに対応させるために snake の数を 4 本にし、消失線付近の主制御点の拘束条件、異なる snake 間の交差禁止処理による収束点の決定により、道路両端白線の内側と外側のすべてのエッジを同時に追跡することができた。さらにファントム実験による定量評価では従来手法に比べて提案手法の追跡精度の向上が確認された。しかし 4 本の snake を同時に扱うため、従来手法に比べ処理時間が増加するという問題が確認さ

れた。

実写動画像では、周辺車輛などのノイズに大きく影響されているため、ロバストな道路エッジ追跡が今後の課題である。提案手法による収束点位置は snake を計算する順序に依存している。今後は計算順序に依存しない方法の検討が求められる。また、消失線付近の主制御点は消失点に存在することが望ましいが、提案手法では簡易的に消失点の位置を決めている。他のコンピュータビジョン技術による主制御点の位置決定とその利用は今後の課題である。

参考文献

- 1) 澤野弘明, 岡田 稔: 車載カメラによる実時間画像処理とその AR 技術に基づく表示方式によるカーナビへの応用, 芸術科学会論文誌, Vol.5, pp.57-68 (2006).
- 2) 二宮芳樹, 高橋 新, 太田允彦: 高速パターン照合手法を利用したレーン認識システム, 信学論 (D-II), Vol.J86-D-II, No.5, pp.625-632 (2003).
- 3) McDonald, J.B.: Application of the Hough Transform to Lane Detection and Following on High Speed Roads, *Proc. Irish Machine Vision and Image Processing Conf.*, 6 pages (2001).
- 4) Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D.: Snakes: Active Contour Models, *Int'l J. of Computer Vision*, Vol.1, No.4, pp.321-331 (1988).
- 5) 八木康史, マイケルブラディ, 川崎剛照, 谷内田正彦: 道路追跡と 3 次元道路形状復元のための動的輪郭道路モデル, 信学論 (D-II), Vol.J84-D-II, No.4, pp.1597-1607 (2001).
- 6) Wang, Y., Teoh, E.K. and Shen, D.: Lane Detection and Tracking using B-Snake, *Image and Vision Computing*, Vol.22, No.4, pp.269-280 (2004).
- 7) Sawano, H. and Okada, M.: A Road Extraction Method by an Active Contour Model with Inertia and Differential Features, *IEICE Trans. Inf. Syst.*, Vol.E89-D, No.7, pp.2257-2267 (2006).
- 8) 澤野弘明, 岡田 稔: 拡張現実感技術を用いた次世代カーナビのための道路端抽出法, 情報処理学会研究報告, Vol.2004, No.121, pp.103-108 (2004).
- 9) POV-Ray. <http://www.povray.org/>

(平成 19 年 1 月 29 日受付)

(平成 19 年 5 月 9 日採録)



澤野 弘明 (学生会員)

平成 16 年中部大学工学部情報工学科卒業, 平成 18 年早稲田大学大学院情報生産システム研究科修士課程情報生産システム工学専攻情報アーキテクチャ分野修了, 同年同大学院博士後期課程進学, 平成 19 年日本学術振興会特別研究員採用, 現在に至る. コンピュータビジョン, 拡張現実感に関する研究に従事. 電子情報通信学会, 画像電子学会, ACM 各学生会員. 平成 16 年電気学会優秀論文発表賞受賞.



岡田 稔 (正会員)

昭和 59 年名古屋工業大学工学部電気工学科卒業, 平成元年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程情報工学専攻修了. 工学博士. 昭和 63 年・平成元年度日本学術振興会特別研究員, 平成 2 年名古屋大学情報処理教育センター助手, 平成 5 年同助教授, 平成 10 年同大学院工学研究科情報工学専攻助教授, 平成 11 年中部大学工学部教授を経て, 平成 15 年 4 月早稲田大学大学院情報生産システム研究科教授, 現在に至る. 平成 7 年より 1 年間, 米国ミシガン大学客員准教授. 画像とパターンの認識・理解, 計算幾何学, 画像合成, 知能メディア情報処理の基礎理論と応用に関する研究に従事. 電子情報通信学会, 画像電子学会, ACM SIGGRAPH, IEEE Computer Society (Senior), Eurographics 各会員. 平成 4 年度情報処理学会研究賞, 平成 6 年度市村賞学術貢献賞, 平成 12 年情報処理学会優秀教育賞, 平成 18 年 FIT 論文賞各受賞. 著書『C によるプログラミング演習』(近代科学社),『情報科学基礎論』(朝倉書店),『インターネット時代のコンピュータ活用法』(コロナ社)等.