

道路追跡のための平行性拘束を持つ動的輪郭モデル

川崎 剛照¹⁾, 八木 康史¹⁾, Michael Brady²⁾, 谷内田 正彦¹⁾

¹⁾大阪大学大学院基礎工学研究科, 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3

²⁾Department of Engineering Science, Oxford University, Parks Road Oxford OX1 3PJ, United Kingdom

あらまし: 自動車の走行制御を行ううえで視覚情報を用いる研究は数多くなされている。なかでも自律走行制御においては, 進行方向前方の道路形状を理解することがとりわけ重要な要素である。

本稿では, 単眼カメラで撮影された道路シーンから道路領域を発見・追跡すると同時にその3次元形状を復元することのできる道路表現モデルを提案する。本モデルでは, 道路の平行性の関係を動的輪郭モデルの制約条件とすることで, 道路境界を安定に追跡しながら滑らかで正確な道路形状を復元することができる。2000枚の実環境道路シーンに対して実験を行った結果, 動的輪郭モデルを構成するコントロールポイント総数の96[%]が安定した道路領域を抽出することができた。

Active Contour Model for Smart Vehicle

Yoshiteru KAWASAKI¹⁾, Yasushi YAGI¹⁾, Michael Brady²⁾, Masahiko YACHIDA¹⁾

¹⁾ Graduate School of Engineering Science, Osaka Univ., 1-3 Machikaneyama Toyonaka Osaka 560-8531, Japan

²⁾ Department of Engineering Science, Oxford University, Parks Road Oxford OX1 3PJ, United Kingdom

Abstract: Researchers have investigated visual-navigation of autonomous road vehicles using several visual information sources such as color, disparity, range, optical flow, etc. In particular, recognition of the forward road path is an important issue for developing intelligent road vehicles.

In this paper, we propose a method for solving a general problem of a road tracking and 3D-shape reconstruction for a smart vehicle. Generally, both sides of road boundaries are parallel and the width of road is constant. Thus, we detect and track the road region in the image by using active contour models with a parallel constraint. The system can then generate the 3D-road model from a single image. We apply the method to real road scenes of more than 2000 images for evaluating effectiveness.

1. はじめに

自動車の走行制御を行ううえで視覚情報を用いる研究は数多くなされている。なかでも自律走行制御においては, 進行方向前方の道路形状を理解することがとりわけ重要な要素である。

屋外という照明条件が様々に変化する環境において道路境界をロバストに抽出するシステムとして, Waxmanは道路境界を直線で近似して抽出し, その直線の無限遠点から3次元道路形状を復元している[1]。車両の制御を目的とし実時間性を重視したシステムとして, Pomerleauは道路境界線追跡システムRALPHを提案した[2]。このシステムは道路形状に関するパラメータを「仮定と試行」手

法により求めている。すなわち, あらかじめ可能性のある道路形状を「仮定」することで解の探索範囲を大幅に縮小し, その後入力画像に対してフィッティングを「試行」することで最適な道路形状を求めている。ほかにも道路面を連結した数枚の平面として考えて道路境界の抽出を行い, 平面間の連結角により道路形状を表現するシステム[3]などが提案された。しかし, これらの手法によって得られる3次元道路形状はあらかじめ用意したモデルに限定されるため, 詳細な道路形状は抽出されない。

道路形状の3次元復元を行うシステムとして DeMenthonは3次元曲線である道路の中心線に直

交し、かつ水平で長さ一定のセグメントの端点の軌跡を道路境界として表したゼロバンクモデルを提案し、車両直前の初期セグメントから進行方向奥方向へ繰り返して計算により3次元形状を復元した[4].この方法では逐次計算の際に誤差が蓄積し、視点から遠く離れるほど不正確になるという問題があったが、その後DeMenthonらはセグメント端点での左右道路接線を近似的に平行とすることで道路の各点ごとの3次元形状を独立に復元する方法を提案した[5].これにより誤差の蓄積を避けることができるようになったが復元された道路は滑らかとは限らなかった.小林,小澤らは同様の方法でセグメントごとの復元を行った後,適応型フィルタにより道路パラメータの推定をおこなった[6,7].また金谷らは,セグメント列に対し滑らかな曲線をあてはめることで滑らかな道路形状を復元している[8].しかしこれらの手法では,道路領域抽出・対応点の発見・滑らかな3次元形状復元という処理を段階的に処理しており,これらの処理を総合的に行うものではない.

本稿では,単眼カメラで撮影された道路シーンから道路領域を発見・追跡すると同時にその3次元形状を復元することのできる道路表現モデルを提案する.本モデルでは,道路の平行性の関係を動的輪郭モデル[9]の制約条件とすることで,安定に道路境界を追跡しながら滑らかで正確な道路形状を復元することができる.

2. 前提条件および座標系の定義

問題を定式化するにあたり本システムで対象とする道路形状と各座標系を以下のように設定する.

2.1 前提条件

本システムで対象としている道路はDeMenthonが対象としたゼロバンクモデル[5]と等しいものである.すなわち道路面は,長さ一定で水平な線分(以下セグメントと呼ぶ)がセンターラインと中点で直交しながら滑らかにセンターライン上を動く軌跡により成り立っているものとする.またセグメントとその両端での道路接線とは同一平面にあるものとする.勾配があり,かつカーブしている螺旋状の道路では必ずしもこの仮定は成り立たないが,多くの道路では十分な仮定である.

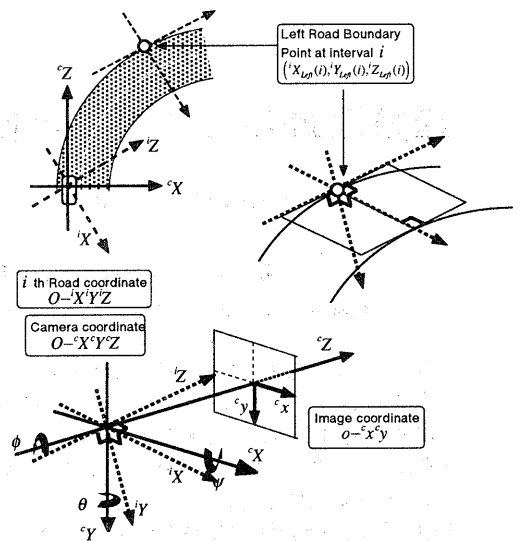


Fig.1 Coordinate System

2.2 座標系の定義

Fig.1に示すように,カメラ座標系 $O-cXcYcZ$,画像座標系 $o-c'x'y'$,道路座標系 $O-iXiYiZ$ の3つの座標系を設定する.

カメラ座標系 $O-cXcYcZ$ は車載カメラのレンズ中心を原点とし,鉛直下向きに cY 軸,光軸方向を cZ 軸にとる左手座標系である.画像座標系 $o-c'x'y'$ は, cZ 軸が画像面と交わる画像中心を原点とし,それぞれ cX 軸, cY 軸と平行となるように $c'x$ 軸, $c'y$ 軸を設定する.また道路座標系 $O-iXiYiZ$ は, i 番目の対応点において局所平面を仮定したとき,道路を幅方向に横断する方向・局所平面に対して直交下方向・道路接線進行方向と等しい姿勢関係をそれぞれ iX 軸, iY 軸, iZ 軸にとり,原点をカメラ座標系の原点に一致させた座標系である.

このとき,カメラ座標系上の点 $[cX, cY, cZ]^T$ の画像面への射影は焦点距離を f として

$$\begin{bmatrix} c'x \\ c'y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cX \\ cY \end{bmatrix} \frac{f}{cZ} \quad (1)$$

で表される.同様に道路座標系の点 $[iX, iY, iZ]^T$ についても,仮想画像面上にこの点が射影されるとすると,この変換は次のように表される.

$$\begin{bmatrix} i'x \\ i'y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} iX \\ iY \end{bmatrix} \frac{f}{iZ} \quad (2)$$

また,道路座標系上の点 $[iX, iY, iZ]^T$ からカメラ座

標系上の点 $[\mathit{c}X, \mathit{c}Y, \mathit{c}Z]^T$ への変換は回転行列 ${}^c\mathbf{R}$ を用いて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} \mathit{c}X \\ \mathit{c}Y \\ \mathit{c}Z \end{bmatrix} = {}^c\mathbf{R} \begin{bmatrix} \mathit{i}X \\ \mathit{i}Y \\ \mathit{i}Z \end{bmatrix}, \quad {}^c\mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^cR_{11} & {}^cR_{12} & {}^cR_{13} \\ {}^cR_{21} & {}^cR_{22} & {}^cR_{23} \\ {}^cR_{31} & {}^cR_{32} & {}^cR_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで回転行列 ${}^c\mathbf{R}$ の各要素は、 $\mathit{c}X$ 軸まわりの回転をpitch: ψ , $\mathit{c}Y$ 軸まわりの回転をyaw: θ , $\mathit{c}Z$ 軸まわりの回転をroll: ϕ とおくと次のように表される。

$$\begin{cases} {}^cR_{11} = \cos\phi\cos\theta \\ {}^cR_{12} = \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ {}^cR_{13} = \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ {}^cR_{21} = \sin\phi\cos\theta \\ {}^cR_{22} = \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi \\ {}^cR_{23} = \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi \\ {}^cR_{31} = -\sin\theta \\ {}^cR_{32} = \cos\theta\sin\psi \\ {}^cR_{33} = \cos\theta\cos\psi \end{cases}$$

3. 消失点を用いた道路表現

一般に空間上の平行線は、透視変換により画像上で1点に交わる。この点は消失点とよばれるが、消失点の現れる位置は平行線のカメラ光軸に対する2つの回転姿勢角度によって決定される。また逆に、画像中での消失点位置がわかると、空間上の平行線のカメラ光軸に対するそれぞれの回転姿勢角度を計算することができる。このことを利用して、直線道路の場合には画像上において道路境界線のつくる消失点位置からその道路のカメラ光軸に対するyawとpitchの値という3次元情報を計算することができる。

一方、道路境界線に直交する平行線群を考えた場合、この平行線からも消失点が生じ、その位置はyawとrollによって決定される (Fig.2)。ここで、道路に片勾配がないという条件からrollの値は0となり、これにより消失点は画像中心を水平に横切る直線上に現れる。このことは道路境界線に直交する平行線群の作る消失点位置がただ1本の直線から求められることを意味する。また対象が直線道路ではなく曲線状の道路であった場合には、その曲線道路を平行な道路境界接線の集合と考えることで道路形状の変化を消失点位置の変化として表現することができる。

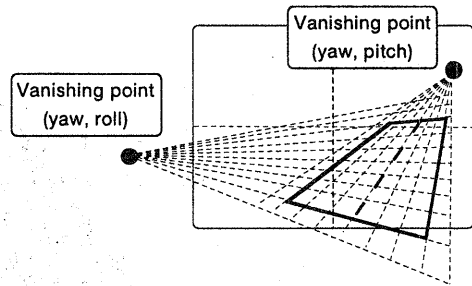


Fig.2 Vanishing point

これら2つの消失点をFig.3に示すようなガウス球面上で考えた場合、ガウス球原点とそれぞれの消失点とを結ぶ2本の直線を考えて、空間上でお互いに直交する平行線があった場合、それらを画像上に射影してできる消失点もまた直交の関係にある。

2次元画像での左右道路境界の対応点発見のために本研究ではこの消失点直交性を用いる。すなわち、左右境界線からそれぞれ1点ずつ選び出した2点が正しい対応点であるかどうかは、それらから計算される2つの消失点が直交しているかどうかで判断する。2つの消失点が直交関係にあった場合には、そのときのyaw,pitch角が道路境界線のカメラ光軸に対する回転姿勢角度となる。

4. 動的輪郭モデル

本節では、2次元画像上で滑らかな道路境界線を抽出できるだけでなく、同時に道路平行性の拘束条件を満たした対応点列を抽出できる動的輪郭モデルについてのべる。

4.1 Cohenの動的輪郭モデル

今回基本とした動的輪郭モデルは、Cohenにより拡張されたモデル[10]である。このモデルでは、輪郭のベクトル表現を $\mathbf{v}(s) = (x(s), y(s))$ として、スネーク全体のエネルギー項 E を次式のように定義している。

$$E = \int_0^1 (E_{int}(\mathbf{v}(s)) + E_{image}(\mathbf{v}(s)) + E_{press}(\mathbf{v}(s))) ds \quad (4)$$

ここで、 E はエネルギー総和、 E_{int} は滑らかさと連続性を示す内部エネルギー項、 E_{image} は対象画像特徴による画像エネルギー項、 E_{press} は輪郭の移動の方向を決める外部エネルギー項である。

内部エネルギー項 E_{int} は、輪郭の1次の偏微分項に対する重み $\alpha(s)$ と、2次の偏微分項に対する

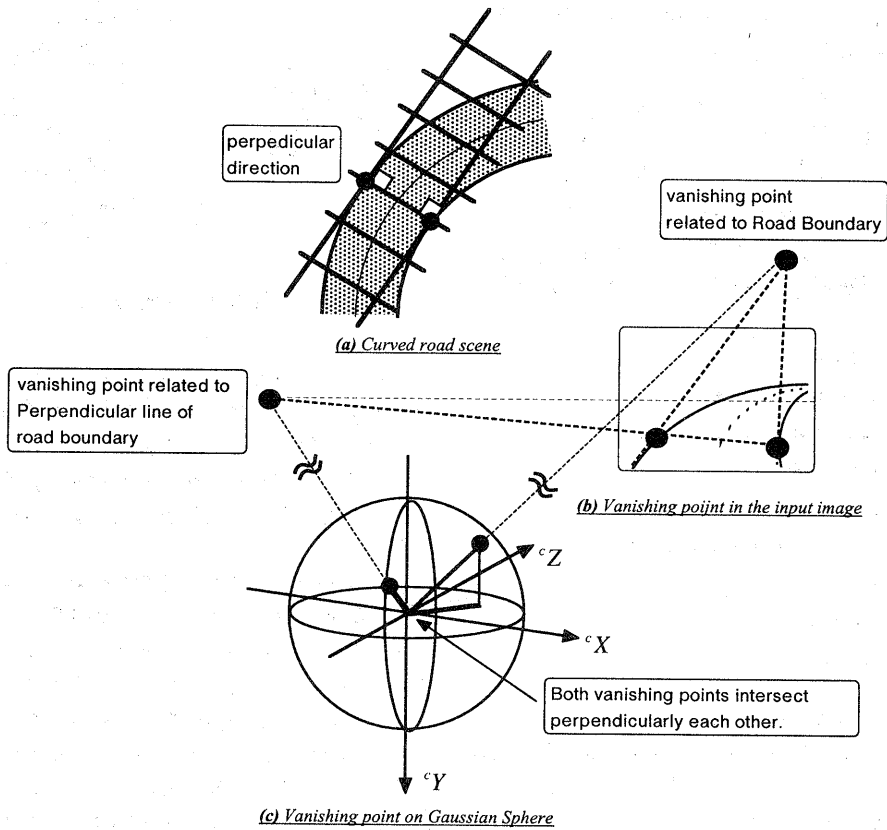


Fig.3 A relation between road boundaries and vanishing points

重み $\beta(s)$ により

$$E_{int}(\mathbf{v}(s)) = (\alpha(s)|\mathbf{v}_s(s)|^2 + \beta(s)|\mathbf{v}_{ss}(s)|^2) / 2 \quad (5)$$

と定義される。

画像によるエネルギー項は E_{image} は、画像の勾配により動的輪郭モデルをエッジに引き付けるもので、次のような画像の1次微分に重みをつけたものを用いる。

$$E_{image}(\mathbf{v}(s)) = -w_{edge} |\nabla I(s)|^2 \quad (6)$$

ここで、 w_{edge} は重み係数、 $I(s)$ は画素の輝度値である。

外部エネルギーは、動的輪郭モデルを輪郭と直交する方向に移動させるエネルギーで、輪郭の移動の方向を決定する。

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{press}}{\partial x} = w_{press} \frac{-\mathbf{v}_s(s)}{\sqrt{|\mathbf{v}_s(s)|^2 + 1}} \\ \frac{\partial E_{press}}{\partial y} = w_{press} \frac{1}{\sqrt{|\mathbf{v}_s(s)|^2 + 1}} \end{cases} \quad (7)$$

ただし w_{press} は、外部エネルギーに対する重みを示す。

これら動的輪郭モデル全体のエネルギー項 E を最小化することにより輪郭線の抽出を行う。

4.2 平行性拘束と滑らかさの拘束を加えた動的輪郭モデル

動的輪郭モデルの強みは、画像特徴量や輪郭のなめらかさといった種類の異なる特徴を、エネルギー総和として1つの関数内に記述できることである。本研究では、このCohenの動的輪郭モデルに対しモデルのエネルギー項として3節で述べた道路平行性と滑らかさの拘束を加え、道路追跡のための動的輪郭モデルへと拡張する。

本研究で提案する道路追跡のための動的輪郭モデルは2本の動的輪郭モデルからなる。道路領域内の適切な位置に初期位置を設定すると、それぞれのモデルは左右の道路境界線に内側から貼り付

くようなかたちで収束する。このときモデルを構成する各コントロールポイントは左右のモデル間で組をなしており、コントロールポイント間の長さが見かけの道路幅を意味している。

平行性の拘束とは、左右コントロールポイント対が左右道路境界線の対応点に収束するための条件である。すなわち、コントロールポイント対の位置によって決定される2つの消失点が直交関係をみたすようにコントロールポイントを移動させるものである。この拘束を付加することにより、カメラ座標に対する道路のyaw角、pitch角を求めることができるようになる。さらに、一般に道路形状はなめらかに変化することを考慮し、各コントロールポイント対から計算されるyaw角の変化をなめらかにするような拘束も加える。これにより復元される3次元道路形状を滑らかなものとすることができる。

本研究で提案する動的輪郭モデルのエネルギー総和 E は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
 E &= \int_0^l (E_{out}(v(s)) + E_{edge}(v(s)) \\
 &\quad + E_{press}(v(s)) + E_{parallel}(v(s))) ds \\
 E_{parallel}(v(s)) &= E_{yaw}(v(s)) + E_{smooth}(v(s)) \\
 \frac{\partial E_{yaw}}{\partial u_{tangent}} &= w_{tangent} (yaw_{roadboundary} - yaw_{roadwidth}) \\
 \frac{\partial E_{yaw}}{\partial u_{normal}} &= w_{normal} (yaw_{roadboundary} - yaw_{roadwidth}) \\
 E_{smooth} &= w_{smooth} |yaw_s(s)|^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、 $u_{tangent}$ および u_{normal} は動的輪郭モデルのコントロールポイント位置 $\mathbf{v}(s)$ における接線および法線単位ベクトルである。また、 $yaw_{roadboundary}$ および $yaw_{roadwidth}$ はそれぞれ道路境界線から生じる消失点、およびそれに直交する直線から生じる消失点からおのおの計算されるyaw角である。また、 E_{yaw} はこの $yaw_{roadboundary}$ と $yaw_{roadwidth}$ との差を最小化する方向へ動的輪郭モデルが変形するようなエネルギー項である。具体的にいうと、今、動的輪郭モデルのコントロールポイント対から計算される2つのyaw角 $yaw_{roadboundary}$ と $yaw_{roadwidth}$ が $yaw_{roadboundary} > yaw_{roadwidth}$ の関係にあるとき、これらの角度差を最小化するためには、1: $yaw_{roadboundary}$ を小さくするか2: $yaw_{roadwidth}$ を大きくすればよい。このとき、Fig.4(a)に示す方向に

コントロールポイントを移動させれば、境界接線方向に生じる消失点のみが移動するため、その消失点位置から計算される $yaw_{roadboundary}$ の値を徐々に小さくすることができる。 $yaw_{roadwidth}$ を大きくする方法についても、Fig.4(b)において同様のことがいえる。また、 E_{smooth} はyaw角のなめらかさを示すエネルギー項で、yaw角の1次微分項に重み w_{smooth} を掛け合わせたものである。

動的輪郭モデルでは、輪郭に関する事前知識をすべてエネルギー関数という形で統合し、その挙動はそれぞれのエネルギー間のバランスによって決定される。このため、おのおのエネルギーの重みパラメータの設定がモデル収束において重要な問題となる。この問題に対し本研究では、実環境で撮影した連続道路画像のうち典型的な道路シーンを10シーン用意し、各シーンから任意の10フレームを抽出、合計100枚の道路画像に対して、動的輪郭モデルが望ましい輪郭として収束するように最適パラメータの学習を行った。このときの初期位置は、あらかじめ目視により設定した真の境界線から左右境界線間を縮める方向へそれぞれ30[pixel]だけ移動させた点として与えた。

α , β , w_{edge} , w_{press} , $w_{tangent}$, w_{normal} , w_{smooth} それぞれのパラメータの組み合わせを様々に変化させ収束結果をみるが、現時点では動的輪郭モデルの収束に約1秒の処理時間を要するため、7つのパラメータを同時に変化させる方法では学習に時間がかかりすぎてしまう。そこでそれらを3つのグループに分けてグループごとに学習を行うようにした。まずエッジ収束に関するグループとして w_{edge} , w_{press} だけを変動させて手入力による真の道路境界線と動的輪郭モデルの収束結果との距離が最小となった w_{edge} , w_{press} の組み合わせを選択し、後にその組み合わせに対して道路平行性に関するグループとして $w_{tangent}$, w_{normal} , w_{smooth} を変動させて収束結果の各コントロールポイント対から計算される $yaw_{roadboundary}$ と $yaw_{roadwidth}$ との差が小さくなったパラメータセットを選択した。そして最後にモデル自体の滑らかさに関するグループとして α , β を変動させ、境界線収束と平行性拘束の2基準から最も良い収束となったパラメータセットを選択した。厳密には各グループ間のパラメータは独立ではないため最終的に得られたパラメータセットが最適解であるとは限らないが、学

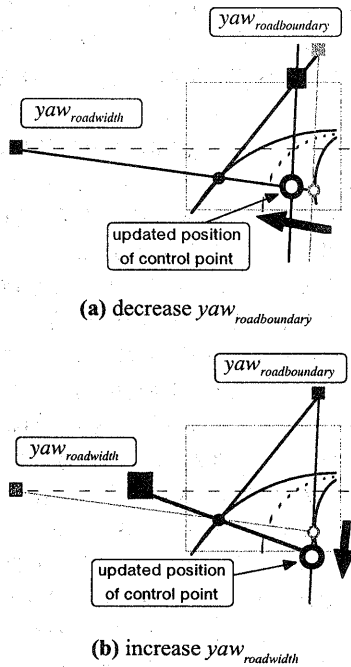


Fig.4 Energy term of a parallel constraint

習に要した時間に対する準最適解としては十分であると考えられる。Fig.5 に学習に用いた道路画像の例を示す。

5. 道路領域追跡と3次元道路形状復元

本研究のシステムは以下に示す処理過程によって道路領域追跡と3次元道路形状復元を行う。

- (i) 初期フレームにおいて、動的輪郭モデルの初期位置を手入力により道路境界線付近に設定する。道路境界が明瞭な画像の場合には領域拡張法など従来手法によりこの手順を省略することもできる。
- (ii) 設定された初期位置から動的輪郭モデルの変形を開始する。ここでモデルの進む方向は道路領域内から左右境界線へ向かって広がる方向に設定した。変形の過程において、現ステップでの仮の道路境界線とその消失点列をもとにyaw角の変化を評価し、その変化が滑らかとなるようにモデル変形を行う。
- (iii) モデルの収束結果から3次元道路形状を復元する。
- (iv) (ii)の収束で得られた左右道路境界線を、

それぞれ道路中央方向へ一定値だけ縮めた位置を次のフレームの収束における初期位置として設定する。この処理において縮小する割合は経験的に求めた値として30[pixel]とした。(v) (ii)に戻る。

上記(iii)項の3次元復元は以下の方法により行う。

(1),(2),(3)式より、入力画像上の点 ${}^c[x, y]^T$ は次式の変換により*i*番目の仮想画像平面 $o-{}^i x^i y$ 上の点 ${}^i[x, y]^T$ へと射影される。

$$\begin{bmatrix} {}^i x \\ {}^i y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i X \\ {}^i Y \end{bmatrix} \frac{f}{{}^i Z} = \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} {}^c R_{11} & {}^c x + {}^c R_{21} & {}^c y + {}^c R_{31} f \\ {}^c R_{12} & {}^c x + {}^c R_{22} & {}^c y + {}^c R_{32} f \end{bmatrix} \times \frac{f}{{}^c R_{13} {}^c x + {}^c R_{23} {}^c y + {}^c R_{33} f}$$

一方、左右道路境界線の対応点列のうち*i*番目の点を $o-{}^i X^i Y^i Z$ 座標系で見たときの座標が左右それぞれ $({}^i X_{Left}(i), {}^i Y_{Left}(i), {}^i Z_{Left}(i))$, $({}^i X_{Right}(i), {}^i Y_{Right}(i), {}^i Z_{Right}(i))$ で表されているとすると、道路に片勾配がないという仮定より、その高さ成分 ${}^i Y_{Left}$ と ${}^i Y_{Right}$ とは等しくなる。よって、対応点間の長さすなわち道路幅 $Width$ について次の等式がなりたつ。

$$Width = {}^i X_{Left}(i) - {}^i X_{Right}(i) = \left\{ {}^i x_{Left}(i) - {}^i x_{Right}(i) \right\} \frac{{}^i Z(i)}{f} \quad (10)$$

動的輪郭モデルの収束によって得られた対応点の画像座標とそのときのyaw, pitch角の値を(9)式に代入し、これと(10)式を用いることで、カメラ座標系 $o-{}^c X^c Y^c Z$ からみた左右境界線の対応点座標 $({}^c X_{Right}(i), {}^c Y_{Right}(i), {}^c Z_{Right}(i))$, $({}^c X_{Left}(i), {}^c Y_{Left}(i), {}^c Z_{Left}(i))$ を求めることが出来る。

6. 実験結果

実環境の道路シーンに対して本システムの有効性を評価するためオフライン実験を行った。道路シーンの撮影には、時速約50[km]で走行する自動車に搭載したCCDビデオカメラ(DVCAM)を用いた。実験に用いた道路は、カーブの有無、勾配の有無、境界線の状態が明瞭な白線で示されているもの、白線はあるがところどころ不明瞭になっているもの、白色破線で示されているもの、白線はないが側溝や歩道により境界だとわかるもの、照明条件として日中と夜間のものといった多様な条件の道路画像2000枚(画像サイズは680×454

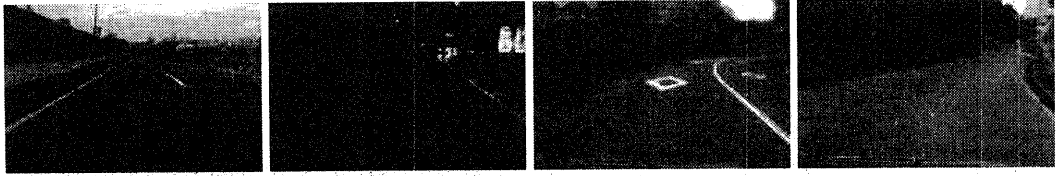


Fig.5 Typical road scenes

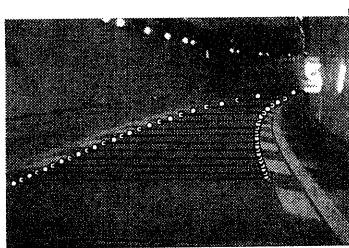
[pixel]) を実験に用いた。

動的輪郭モデルの重みパラメータ α , β , w_{edge} , w_{press} , $w_{tangent}$, w_{normal} , w_{smooth} の学習結果はそれぞれの 1.0, 2.0, 1.0, -23.0, 0.0213, 14.3, 0.425 となった。

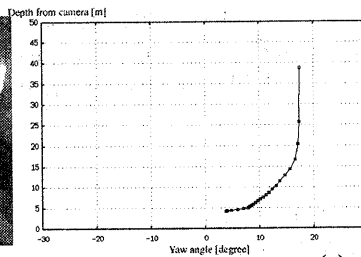
Fig.6 に動的輪郭モデル収束結果の例を示す。Fig.7 はこのときの yaw, pitch 角の推定結果である。道路境界線抽出の収束結果評価を評価するために手入力で与えた真の道路境界線との距離を収束誤差として測定した。実験に用いた 2000 枚の画像に対して収束した動的輪郭モデルを構成するコントロールポイント総数 88,438 個のうち、収束誤差が 8 [pixel] 以下のものを抽出成功とすると道路境界線の抽出に成功した割合は 96[%] という結果になった。一方 Fig.6(b) は境界線抽出の失敗例である。この図において、画像上部の動的輪郭モデルが本来の道路境界線とは異なった位置に収束している。動的輪郭モデルは収束の過程においてエネルギー

を最小化する方向へ変形していくが、この例の場合には道路境界線に到達するよりも前に局所最小値に収束してしまったためだと考えられる。しかしながら、Fig.7(b) で示されるように、推定された yaw 角は十分になめらかなものであり、平行性の拘束は有効に働いていることが確認できる。

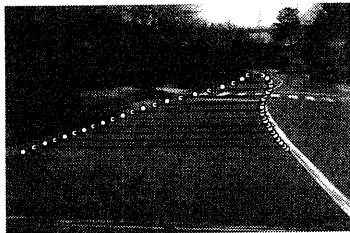
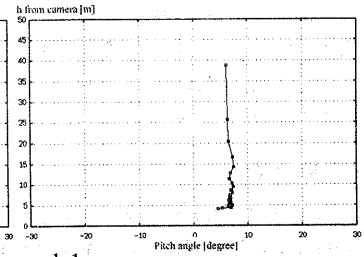
Fig.8 に 3 次元道路形状を復元した結果を示す。小さい立方体はカメラ位置を示している。上面図を見てもわかるようになめらかな道路形状が復元されたことが確認できる。この点に関して、3次元復元の安定性を評価するための実験を行った。自己移動量を既知としたとき、ある入力画像に対する 3次元復元結果と、その画像の前後のフレームでの復元結果を自己移動量だけ補正した結果を重ね合わせ、そのときの重なり誤差を 3次元復元の安定性として評価した。その結果、カメラからの奥行き距離が 25[m] 以下で時系列間での重なり誤差が 10[cm] 以下の部分が 93[%] であった。また、



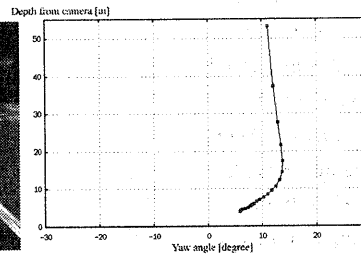
(a) example1



(a) example1



(b) example2



(b) example2

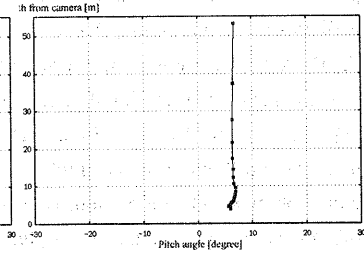


Fig.6 Results of converged active contour road model

Fig.7 Estimated yaw angle(left) and pitch angle(right)

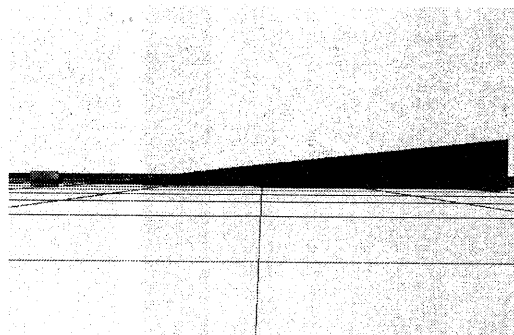
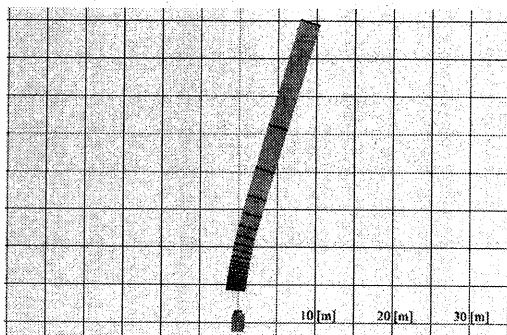


Fig.8 The 3D Road shape reconstructed Result of Figure 8(a)

カメラからの距離が25-50[m]の場合、重なり誤差30[cm]以下の部分が95[%]という結果になった。このことから、動的輪郭モデルのなめらかさにより、安定した3次元道路形状の復元が行えていることがいえる。

7. おわりに

本稿では、実環境の道路シーンにおいて道路領域の追跡と3次元道路形状復元を同時に行うことを目的とした、平行性拘束を加えた動的輪郭モデルを提案した。2000枚の多様な道路画像を用いて本手法の有効性を評価した結果、96[%]に対して安定な道路追跡が行えた。また、道路形状の3次元復元においても、安定した復元が行えることが確認できた。今後は、本稿で提案した動的輪郭モデルを自動車操舵角度のフィードフォワード制御に応用していく予定である。

参考文献

- [1] A. M. Waxman, J. J. Lemoigne, L. S. Davis, B. Srinivasan: "T. R. Kushner and E. Liang, A visual navigation system for autonomous land vehicle", IEEE J. Robotics and Automation, RA-3, 2, 124-141 (1987)
- [2] D. Pomerleau, RALPH: "Rapidly adapting lateral position handler" Proc. Intelligent Vehicles (1995)
- [3] S. Lee, K. S. Boo, D. Shin and D. H. Lee: "Automatic lane following with a single camera" Proc. Int. conf Robotics and Automation, 1689-1694 (1998)
- [4] D. Dementhon: "A zero-bank algorithm for inverse perspective of a road from a single image", Proc. IEEE ICRA, 1444-1449 (1987)
- [5] D. Dementhon and L.S. Davis: "Reconstruction of a

road by local image matches and global 3D optimization", Proc. IEEE ICRA, 1337-1341 (1990)

[6] 小林哲也, 小澤慎治: "道路像解析における対応点の決定法", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J72-D-II, No.5, pp.827-830(1989)

[7] 丹波信行, 千葉昌孝, 小澤慎治: "連続道路画像からの車両姿勢角の推定", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J75-D-II, No.3, pp.490-499(1992)

[8] 金谷健一, 渡辺一成: "局所平面近似による道路形状復元", 日本ロボット学会誌, 8巻4号, pp407-412(1990)

[9] M. Kass, A.P. Witkin, D. Terzopoulos: "Snakes: Active Contour Models", IJCV(1), 4, 321-331 (1988)

[10] L. Cohen, I. Cohen, A fine element method applied to new active contour models and 3D reconstruction from cross sections, Proc. ICCV, 587-591 (1990)