

地図と画像の融合によるレーン形状推定方法の提案

小島祥子, 山田啓一, 二宮芳樹
(株)豊田中央研究所 センシングシステム研究室

あらまし 衝突警報システムなどの将来の自動車の走行支援システムでは, 前方で検出した物体と自車両との衝突危険性を判定するため, 車両前方のレーン位置情報を取得する必要がある. しかし, 車載カメラ画像によってレーン位置推定を行った場合, 一般道路ではカーブや道路勾配, 解像度の限界によって遠方で十分なレーン位置推定精度が得られないという問題がある. 我々は画像と道路地図と DGPS の測位結果を融合して三次元レーン形状を推定する手法を提案する. 提案手法は, 画像による遠方の推定精度不足を地図の情報で補償することができる. 本稿ではその有効性を模擬データと実環境下のデータを用いて検証する.

Proposal for 3-D lane shape estimation method from a digital road map and an image

Yoshiko Kojima, Keiichi Yamada, Yoshiki Ninomiya
Sensing System Lab. Toyota Central R&D Labs., Inc.

Abstract In the future driver assistance systems, to estimate the lane shape is important in order to judge whether detected objects are dangerous or not. There are some methods to estimate the lane shape by an image from a camera, however the results are not sufficient due to the curvature, the slope, and the image resolution. In this paper, we propose new method to estimate the 3-D lane shape by fusion of a 2-D digital road map, DGPS, and an image from a camera. Our method can compensate for the lack of the distant lane estimation accuracy. And in this paper, the effect of our method is confirmed by using model data and actual data.

1. はじめに

近年, ITS における自動車側からのアプローチとして様々な走行支援システムが提案されている. 現在, 高速道路で先行車両に対して自動的に車間距離制御を行う ACC (Adaptive Cruise Control) が実用化されている. 将来は前方の障害物を検出し危険判定をする衝突警報システムや一般道路で利用できる ACC などの実現が望まれている. これらのシステムは, 検出された物体が自車両の制御対象であるかを判定するために, 物体と自車両が走行するレーンとの相対的な位置関係を判定する必要がある.

車載カメラで撮像された前方の画像上で. レー

ンと障害物位置が得られれば, その相対的な位置関係の判定は多くの状況で可能である. しかし, 道路のカーブや勾配, 天候や照明条件などによって, 画像上では障害物とレーンの位置関係を判定できない状況がある. 図1はカーブ上に車両が存在する状況であり, 画像上では前方車両とレーンとの位置関係の判定が困難な例である.

この問題の解決のため, 我々は次の手段をとる.

- 1) 自車両に対する障害物の水平面上の位置をレーダによって正確に検出
- 2) 単眼画像と道路地図と GPS によって自車両に対するレーンの水平面上の位置を推定

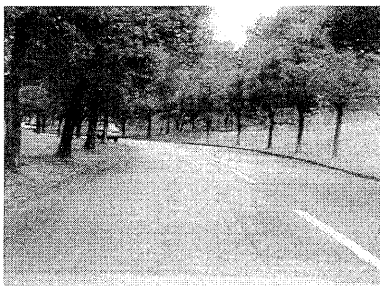


図 1:画像上での判定が困難な例

3) 得られた水平面上の障害物位置と水平面上のレーン位置を比較し、位置関係を判定
本稿では特に、2)のレーン位置を推定する新しい方法を提案し、その効果を示す。ここで、一般道路(制限時速 60km, 道路幅 3.0m)での衝突警報システムを想定する。時速 60km で走行中に安全に停止するためには 50m 必要である。また、前方障害物とレーンとの位置関係から、衝突危険性を判定するためには、0.3m のレーン位置精度が必要である。本稿では、衝突警報システムなどでは 50m 先でのレーン位置が 0.3m の精度で推定される必要があるとした。

自車両を中心とした座標系でレーン位置を推定する方法の一つに、道路地図と GPS を用いる方法がある。正確な道路地図と地図上のレーンに対する自車両の正確な位置と姿勢を取得できれば、レーン形状推定を行うことができる。しかし現在利用できる 1/2500 程度の道路地図や DGPS では、形状精度は $\pm 0.5m$ 程度、測位精度は 1m 程度であり、精度が不足する。CMU の Langer らは、車載カメラの画像を利用して車両のレーンに対するヨー角を推定し、GPS の精度を補償する方法を提案している[1]。しかし、画像のみを用いたヨー角推定では、道路勾配が変化する場合に誤差が増大する。

また、画像中のレーン形状から自車両に対する水平面上のレーン形状を推定する方法もある。最も単純な方法は、前方の道路面は水平であると仮定し、画像中のレーン形状を水平面に投影して推定する方法である。しかしこの手法は、水平面仮定が成立しない場合に誤差が大きくなるため、勾配変化を含めた三次元レーン形状推定が必要になる。

DeMenthon はレーン幅一定という拘束条件から三次元レーン形状を推定するゼロバンクアルゴリズムを提案した[2]。しかしこの方法は遠方に行くほど逐次推定誤差が累積する。また、金谷らは局所平面近似によって三次元レーン形状推定を行い、ゼロバンクアルゴリズムの誤差の累積を防ぐ手法を提案した[3]。しかし一般的な解像度のカメラ(解像度 640x480 pix 程度)を用いる限り、解像度の限界のため遠方の推定精度を確保できない。ステレオ視を用いてレーンの三次元形状を推定する方法もあるが、同様にカメラの解像度による限界がある。

道路地図と GPS のみを用いた手法や、画像のみを用いた手法は、目標とする推定精度の達成が困難であることが分かった。そこで我々は、現実的に利用できる程度の、カメラ画像(640x480 pix)と DGPS(精度 1m)と道路地図(1/2500)の情報を融合することによって、三次元レーン形状を推定する方法を提案する。提案手法は、画像を用いた場合に問題となったレーンの勾配変化の推定に地図を利用し、自車両の位置姿勢の推定に画像を利用することで目標精度の達成が期待できる。

なお、道路地図と GPS と画像を用いて三次元レーン形状を推定する方法として、内村らは道路地図と GPS と画像のほかに 3 軸ジャイロを用いた手法を提案している[4]。しかし、この手法は GPS の高さ情報から自車両位置の三次元レーン位置を取得し、走行履歴によって三次元レーン形状を推定する手法であり、車両前方の三次元レーン形状を推定するものではない。

2. 画像・地図情報融合型レーン位置推定

2.1 カメラと座標系

本稿で用いる座標系を図 2 に示す。地図座標系 $O_m-(X_m, Y_m, Z_m)$ 、カメラ座標系 $O_c-(X_c, Y_c, Z_c)$ 、画像座標系 $O_i-(X_i, Y_i)$ の 3 つの座標系からなり、お互いの座標系の関係は以下の式(1),(2)で示される。なお、 $f[\text{mm}]$ はカメラの焦点距離とし、カメラ撮像面は $w \times h$ [mm] でその解像度は $M \times N$ [pix] とする。

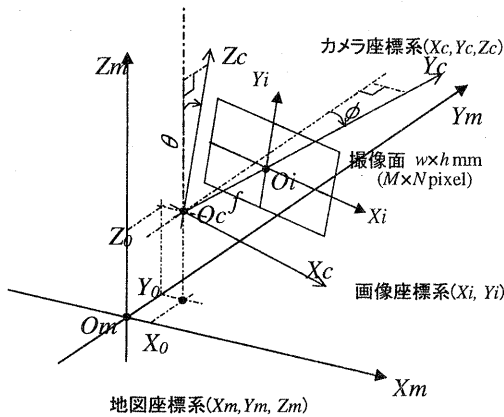


図2: 座標系

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \beta \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} \dots (2)$$

2.2 提案方法

図3に提案手法の概要を示す。ここでは画像上のレーン形状を点列 $P_i=(X_i, Y_i)_{i=1,2,m}$ で表し、地図上のレーン形状を点列 $Q_j=(X_m, Y_m)_{j=1,2,n}$ で表す。自車両の初期位置はDGPSによって測位され、レーンに対する初期姿勢は画像によって推定される。

位置と姿勢の初期値に基づいて画像上のレーン形状 P_i をカメラ中心から三次元空間内に投影すると、図3に示すような広がりを持つ三次元レーン形状候補領域が得られる。また、地図上のレーン形状 Q_j を三次元空間内に垂直投影すると、同様に三次元レーン形状候補領域が得られる。双方の候補領域を重ねあわせ、双方の照合度が高くなるように自車両の位置と姿勢を補正するとともに、三次元座標の点列 $Q_k=(X_{m_k}, Y_{m_k}, Z_{m_k})_{k=1,2,l}$ を抽出することで、三次元レーン形状を推定できる。

道路地図とDGPSを用いた場合に誤差が大きい自車両の位置と姿勢は、画像を用いることで補正され

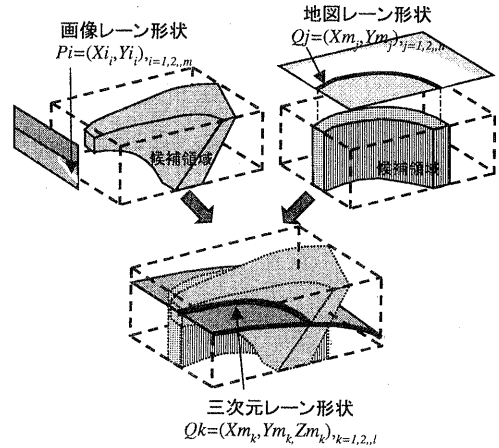


図3: 三次元レーン形状推定

る。また、単眼画像のみを用いた場合に誤差が大きい、勾配変化のある状況での遠方のレーン位置は、地図を用いることで補償される。さらに、レーン形状の照合から進行方向位置も補正され、レーンの三次元位置が推定されるため、遠方のレーン形状推定精度が向上する。

2.3 照合方法

三次元レーン形状推定の具体的な手順を示す。推定する三次元形状を、水平面形状をクロソイド曲線、垂直面形状を二次曲線であると仮定する。クロソイド曲線とは、道路構造令[5]で定められた道路の基本的な形状であり、曲率が距離に応じて変化する曲線である。 l をクロソイド曲線の接線方向とすると、三次元上の点は式(3)のようなパラメータによって l の関数で示される。クロソイド初期中心を (C_{rox}, C_{roy}) 、初期半径を R_0 、曲率変化率を α 、初期位相角を ϕ_0 とする。

地図上のレーン形状と推定したレーン形状の照合度を示す評価関数を E_{map} 、画像上のレーン形状と推定した形状の照合度を示す評価関数を E_{image} とする。 E_{map} は地図上のレーン形状 Q_j を三次元空間に垂直投影した形状とクロソイド曲線との距離 r_{mapj} の二乗和の平均であり、 E_{image} は画像上のレーン形状 P_i を三次元空間に透視投影した形状とクロソイド曲線との距離 r_{imagei} の二乗和の平均である。

$$\left\{ \begin{aligned} X_m(l) &= C_{rox} + \int \frac{\alpha R_0^2}{(\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1)^2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) dl \\ &\quad + \frac{R_0}{\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1} \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) \quad \dots(3) \\ Y_m(l) &= C_{roy} + \int \frac{\alpha R_0^2}{(\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1)^2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) dl \\ &\quad + \frac{R_0}{\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) \\ Z_m(l) &= a \cdot l^2 + b \cdot l + c \end{aligned} \right.$$

$$w \cdot E_{map} + (1 - w) \cdot E_{image} \quad \dots(4)$$

$$\text{但し, } \left\{ \begin{aligned} E_{map} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_j (r_{mapj})^2 \\ E_{image} &= \frac{1}{m} \cdot \sum_i (r_{imagei})^2 \end{aligned} \right.$$

重み係数 $0 < w < 1$

なお、自車両のクローン接線方向位置を l_0 とし、クローン接線方向に対するカメラのヨー角を ϕ_{yaw} 、オフセット位置を d 、道路曲面に対するカメラのピッチ角を θ_{pitch} とする。図2に示した ϕ は ϕ_{yaw} と、クローン曲線の接線と Y_{map} 軸とのなす角の和であり、 θ は θ_{pitch} と、二次曲線の X_m - Y_m 座標面に対する傾斜角との和である。式(4)に示す、評価関数の和を最小にするようなパラメータを求めることで、自車両に対する三次元レーン形状を推定することができる。

まず、地図上のレーン形状 Q_j から、水平面レーン形状を示すクローン曲線のパラメータの初期値を決定し、 l 方向の DGPS 測位位置を進行方向初期値 l_0 とする。また画像上のレーン形状 P_i から、自車両の道路面に対するピッチ角 θ_{pitch} と、クローン接線方向に対するヨー角 ϕ_{yaw} 、オフセット位置 d の初期値を推定する。

得られた初期値に基づいて、 E_{map} と E_{image} を算出する。 E_{map} と E_{image} の和が最小になるような12個のパラメータを探索することで、三次元レーン形状と、レーンに対する自車両の位置・姿勢を求めることができる。今回は E_{map} と E_{image} の信頼度は同じであるとし、 w を 0.5 とした。なお、パラメータ探索方法の詳細については本稿では省略する。

3. 提案手法の評価

3.1 模擬データによる検証

提案手法の効果を確認するため、模擬データを用いてレーン形状推定精度の検証を行う。

3.1.1 模擬データ

典型的な例として、道路構造令から決められる制限時速 60km 以下の道路を想定し、提案手法の推定精度を検証する。図4に三次元レーン形状を上方からみた X_m - Y_m 平面形状と、垂直面 l - Z_m 面形状を示す。なお、自車両の実際の位置とレーンに対する姿勢は図4に示す通りとする。但し、自車両の初期位置は DGPS によって測位され、測位位置を O_m (X_m, Y_m) 座標系の原点であるとする。道路地図として 1/2500 の航空写真に基づいて作成された数値地図を利用するとし、地図上のレーン形状 Q_j は実際の形状の水平面座標値を中心に $\pm 0.5m$ 程度の誤差を与えて作成した。画像上のレーン形状 P_i は焦点距離 9mm、撮像面 $4.92 \times 3.69mm$ 、解像度 $640 \times 480 \text{pix}$ のカメラから画像面に透視投影して作成した。設定した各パラメータを表2に「真値」として示す。なお、推定するレーン形状は図4中の右側レーンとし、レーン幅を 3.0m、カメラ中心の道路面からの高さを 1.21m とした。

表2: 推定パラメータ

	真値	初期値	推定値
C_{rox} [m]	-38.0	—	-38.8
C_{roy} [m]	-40.0	—	-42.2
R_0 [m]	60.0	—	62.5
α	-4.17×10^5	—	-3.73×10^5
ϕ_0 [deg]	41.8	—	42.7
a	-3.56×10^4	—	-4.0×10^4
b	8.00×10^4	—	8.0×10^4
c	0	—	0
l_0 [m]	6.00	—	4.63
d [m]	1.50	0.96	1.58
ϕ_{yaw} [deg]	3.00	-4.80	3.54
θ_{pitch} [deg]	2.00	0.93	2.07

3.1.2 推定結果

提案手法に基づいて、式(4)を最小とするような三次元レーン形状と自車両のレーンに対する位置・姿勢を推定した結果を表2に示す。なお、単眼画像によって推定されたレーンに対する自車両の姿勢を「初期値」として示す。

推定されたパラメータから算出した水平面レーン形状を図5に示す。原点を自車両位置とし、横軸を自車両の進行方向とする。実形状を細実線で示し、提案手法により推定された結果を太実線で示す。また、従来手法との比較のため、単眼画像による水平面仮定時の推定結果を点線で示し、画像によってレーンに対する姿勢を補正し、道路地図とDGPSから推定した結果をプロット点で示す。図6にレーン形状推定誤差を示し、横軸を自車両からの距離、縦軸を推定誤差とする。また、図7に垂直面のレーン形状推定結果と実形状を示す。

図5より、画像や地図によるレーン形状推定結果は遠方で誤差が増大することに対し、提案手法による推定結果は実形状とよく一致していることがわかる。また図6より、画像や地図による推定結果は目標に満たないことに対し、提案手法による推定誤差は50m先0.3m以下であり、目標精度を達成できていることがわかる。また図7より、垂直面についても推定形状は実形状によく一致し、三次元レーン形状推定が可能であることがわかる。

レーン形状や自車両の位置や姿勢が異なる場合にも同様の検討を行い、提案手法は50m先で横位置0.3mのレーン形状推定精度を達成できる可能性があることがわかった。

3.2 実環境での検証

実際の道路で本手法を適用した結果を示す。勾配変化のある道路では三次元レーン位置の真値を得ることは困難であるため、本稿ではほぼ平坦な道路(図1)について提案手法を適用した。推定結果は50m先のレーン位置で評価した。実測より、50m先のレーン位置は自車両の進行方向に対し、-0.32mであった。また図8に示すような形状の、1/2500の航空写真に基づいて作成された地図を利用した[6]。

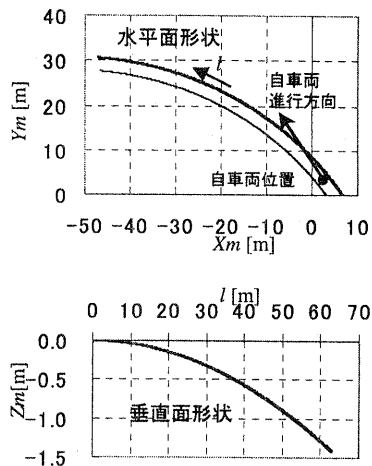


図4 模擬レーン形状

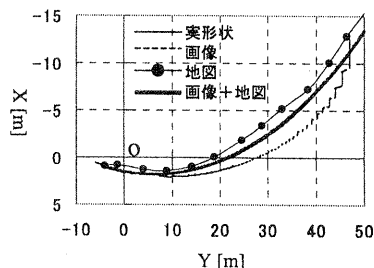


図5: 水平面レーン形状推定結果

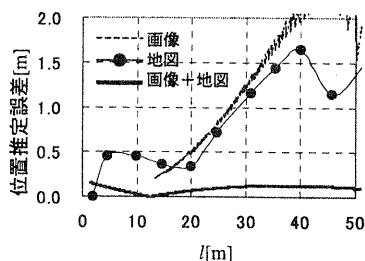


図6: 水平面レーン形状推定誤差

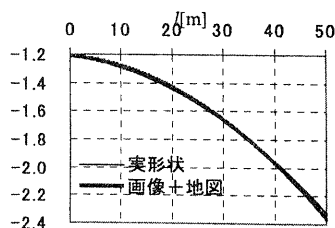


図7: 垂直面レーン形状推定結果

図 9 に水平面でのレーン形状推定結果を示す。自車両位置を原点として、横軸を自車両の進行方向とする。評価点とした 50m 先の横位置($X=-0.32\text{m}$)を図中に示す。平坦な道路であっても画像のみに基づく推定結果は、解像度の限界により遠方では誤差が大きくなっている。また、道路地図と GPS に基づく推定結果は、自車両の進行方向位置の誤差のため、遠方で誤差が生じている。画像を用いた場合も道路地図と GPS を用いた場合も、推定値は $X=0.56\text{m}$ であり、正解位置に対して 0.88m の誤差が生じていることがわかる。しかし、提案手法による推定結果は、評価位置での推定値は $X=-0.37\text{m}$ であり、誤差は 0.05m である。以上のように目標とする精度で 50m 先のレーン位置を推定でき、提案手法の効果を実際の道路環境下においても確認できた。

4. まとめ

衝突警報システムなどの走行支援システムの実現には、前方に検出した物体と自車両の走行するレーンの位置関係を判定する必要がある。一般道路のレーン形状を想定した場合、画像上で障害物とレーンの位置関係の判定が困難な状況が予想される。この場合、我々は障害物をレーダなどで検出し、レーンの位置を画像と道路地図と DGPS を用いて推定し、双方を比較することで、位置関係を判定する方法を採用した。

我々は画像と道路地図と DGPS を融合し、画像上のレーン形状と地図上のレーン形状の照合度が高くなるように三次元レーン形状と、レーンに対する自車両の位置と姿勢を推定する手法を提案した。画像のみでは勾配や解像度の限界から、推定精度が劣化する状況においても、提案手法は地図を用いることで遠方精度不足を補償することができる。

模擬データと実環境下のデータに対し本手法を適用した結果、目標とした 50m 先でのレーン横位置推定精度 0.3m を達成できる可能性があり、本手法の有効性を確認した。

今後の課題として、本手法の適用限界の把握と、探索方法の高速化に順次取り組む予定である。

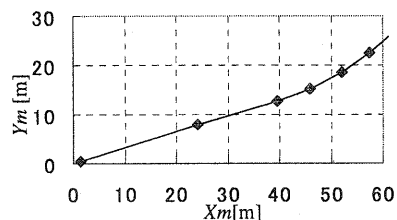


図 8: 地図上のレーン形状

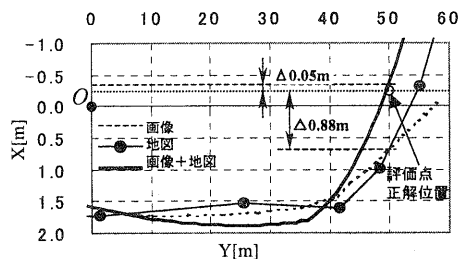


図 9: 実環境下水平面レーン形状推定結果

参考文献

- [1]Langer: “An Integrated MMW Radar System for Outdoor Navigation”, CMU-RI-TR,97-03(1997)
- [2]DeMenthon: “A zero-bank algorithm for inverse perspective of a road from a single image.”, Proceeding IEEE International Conference Robotics and Automation, pp1444-1449(1987)
- [3]金谷, 渡辺: “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)
- [4]山肩, 胡, 内村, 脇坂: “VICNASを用いた精密な路上位置測定”, 道路交通研究会資料, RTA-99-17, pp.7-12(1999)
- [5]道路構造令(1970)
- [6]地図データ, 数値地図 2500 空間データ基盤愛知 7, 国土地理院(1998)