

複数センサ情報の融合による走行環境認識技術

二宮芳樹，加藤武男，小島祥子

Sensor Fusion for Road Environment Recognition

Yoshiki Ninomiya, Takeo Kato, Yoshiko Kojima

要 旨

自動車の安全性向上をねらった運転支援システムでは，車両前方の物体を検出してその衝突危険判断を行うことは本質的な機能の一つである。危険判断のためには物体とレーンの位置関係を求める必要があるが，現状のセンサでは検出精度不足のため，50m先に停止する車両等との衝突判断が困難になる場合がある。この問題を解決するために，複数のセンサの情報を融合する物体とレーンの検出方法を提案した。物体の検出は距離精度の高いミリ波レーダと角度分解能の高いマシンビジョ

ンを融合する。マシンビジョンで物体領域を抽出する方法として移動ステレオ法を用い，レーダから得られる距離値を用いることにより処理時間を大幅に短縮できた。レーンの検出はマシンビジョンとDGPSとデジタル地図を融合する。誤差要因のレーンの勾配変化を画像情報と地図の融合により補正できた。提案した手法を実際の道路環境で評価し，物体とレーンの両者とも目標とする検出精度0.3m以下を達成していることを確認した。

キーワード

高度交通システム，運転支援システム，センサ融合，画像処理，レーダ，デジタル地図，GPS

Abstract

Detecting forward objects and judging the danger of collision with them is one of the essential functions for driver assistance systems in order to improve safety. The judgment is carried out based on the relative position and occupancy of the object to the lane. The accuracy of the sensors currently used is insufficient to judge a collision with the object which is located 50m ahead.

In this paper, we introduce a sensor fusion technique to solve this problem. An obstacle detection method using a millimeter-wave radar which can measure the accurate distance to an object and machine vision which can measure the accurate lateral position of the

object is presented. A motion stereo technique is utilized to extract the boundary of the object and the computational cost is reduced by the distance information measured by the millimeter-wave radar. A lane detection method using machine vision, a 2-D digital road map and a DGPS (Differential Global Positioning System) is presented. The integration of these sensor data makes the estimation of the 3-D lane shape possible. The proposed sensor fusion method was evaluated under real road conditions and confirmed that the accuracy of the position for both objects and lanes is less than 0.3m.

Keywords

ITS, Driver assistance system, Sensor fusion, Image processing, Radar, Digital road map, Global positioning system

1. はじめに

近年、情報処理・通信技術によって道路交通の安全性、利便性、効率の向上をねらったITS (Intelligent Transport Systems) の研究開発が世界中で行われている。ITSの自動車側からのアプローチが走行支援システムであり、様々なシステムが提案されている。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) は走行支援システムの実用化例の一つであり、将来は前方の物体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などの実現が期待されている。これらのシステムの実現に向けての最大の課題は車両周辺のセンシング技術である。本研究は、従来不可能であった一般道路における路上物体に対して衝突可能性判定に必要なセンシング技術を提案し、その技術的な可能性を示す。2章では一般道路における物体の衝突危険性判断に必要なセンシングの課題を述べる。3章と4章では課題の解決を可能にする物体とレーンのセンサ融合による検出技術を提案し、その技術的可能性を示す。5章では結論を述べる。

2. 走行支援システムのセンシングの課題

2.1 物体の衝突可能性判定方法

多くの走行支援システムは、車両前方を監視するセンサを備え、検出された物体と自車両との衝突危険性を判定して、ドライバへの警報あるいは減速制御等を行う。衝突危険性は検出した物体と自車両の将来の走行軌跡との干渉から判断される。将来の走行軌跡は遠方では自車両の走行するレーンと一致すると考えられる。そこで、車両前方の物体とレーンを検出し、その位置関係を比較することによりこの判定が可能となる。物体とレーンの位置関係は、車両前方を撮像したカメラ画像中での相対的な位置関係のみからでも判断可能な場合もある。しかし、レーンが横断曲率、縦断曲率を有する場合など、一般的にはこの方法は適用できない。そのため、物体とレーンの三次元空間でのそれぞれの位置を求めて、その位置関係から衝突危険性を判断する方法が必要である。

本稿では走行支援システムとして、一般道路 (制限時速60km, 道路幅3.0m) で使用する衝突防止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の距離が必要である。また、前方物体とレーンとの位置関係から、衝突危険性を判断するためには、物体を回避する時の余裕を0.6m程度必要と仮定すると、物体とレーンの双方の距離方向、

横方向の位置を0.3m以下の精度で検出する必要がある。物体の位置とは、衝突危険性を物体の占有する領域と自車両の将来の走行軌跡との干渉度合いから判定するため、物体の境界位置を意味する。

2.2 センシングの課題

衝突防止システムのセンシングの課題を物体の検出とレーンの検出についてそれぞれ整理する。

前方の物体を検出するセンサとしては、アクティブ方式としてミリ波レーダやレーザレーダ、パッシブ方式としてビデオカメラで撮像された画像に基づくマシンビジョンが使われている。レーザレーダやミリ波レーダは物体までの距離を0.1mの精度で検出可能であるが、横方向の分解能は低く、物体の境界を0.3m以内の精度で検出することは困難である。また、マシンビジョンは物体の横方向の位置検出精度は高いが、距離精度はステレオ視を用いても、画像の解像度の制約から、視野40度の一般的なカメラ画像 (640 × 480 画素) では50m前方で距離精度0.3mを達成できない。したがって、単一で一般道路での物体検出の機能を実現できるセンサはない。

そこで物体検出の課題を解決するために、レーダの高精度な距離検出機能と、マシンビジョンの空間分解能の高い物体形状検出機能を相補的に利用することにより、50m先で目標とする物体検出精度を達成する方法を提案する。

一方、車両前方のレーンを検出できるセンサとしてはマシンビジョンが一般的に利用されているが¹⁻³⁾、一般的なカメラ画像 (640 × 480 画素) では、その解像度の限界から、目標とする50m先のレーン位置検出精度0.3mを得るのは困難である。他の方法として正確な道路地図と高精度な測位システムによって前方のレーン形状推定を行う方法が提案されているが、これらを広範囲で利用することは困難である。DGPSのような広範囲で利用可能な測位システムは、位置推定精度が不足するため、レーン位置検出精度0.3mを得るのは困難である。

そこでレーン検出の課題を解決するために、現実的に利用可能なカメラ画像 (640 × 480 画素) 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、50m先で目標とするレーン検出精度を達成する方法を提案する。提案手法は、画像から推定する場合に問題となる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。

以下の章では、物体とレーンそれぞれについて融合による検出手法の詳細を示す。

3. ミリ波レーダとマシンビジョン融合による物体検出手法

3.1 提案手法

本章では提案した、レーダの高精度な距離検出機能と、マシンビジョンの空間分解能の高い物体形状検出機能を相補的に利用したセンサ融合手法の詳細について述べる。

マシンビジョンによる物体境界検出手法としては単一カメラ画像から水平エッジや垂直エッジ等の特徴を抽出し、例えば車両が水平方向のエッジを多く含むなどの知識に従い、車両を検出する方法がある。この方法は対象が車両のような規則的なパターンを持つ物体に限定されるために今回の目的には使えない。これに対してステレオ視は物体の三次元構造を推定してその境界を検出するため、対象に依存しない方法である。ステレオ視には複数のカメラを用いる両眼ステレオ視と単一カメラの視点変化に基づく移動ステレオ視がある。両眼ステレオ視は高精度に配置した複数のカメラが必要で高価になるという問題があるため移動ステレオ視⁴⁻⁶⁾を用いる。移動ステレオ視の課題である処理量を削減するために、レーダから得られた物体までの距離に基づき画像上に生じる物体の大きさの変化を予測することが提案手法の特徴である。

ある時刻において、レーダによって検出した物体までの距離を Z とし、その物体上で距離 B だけ隔たった2点の画像中での長さを b とする (Fig. 1)。物体までの距離が ΔZ 変化した場合、2点の長さは

$$\Delta b = \frac{-b \cdot \Delta Z}{Z} \quad (1)$$

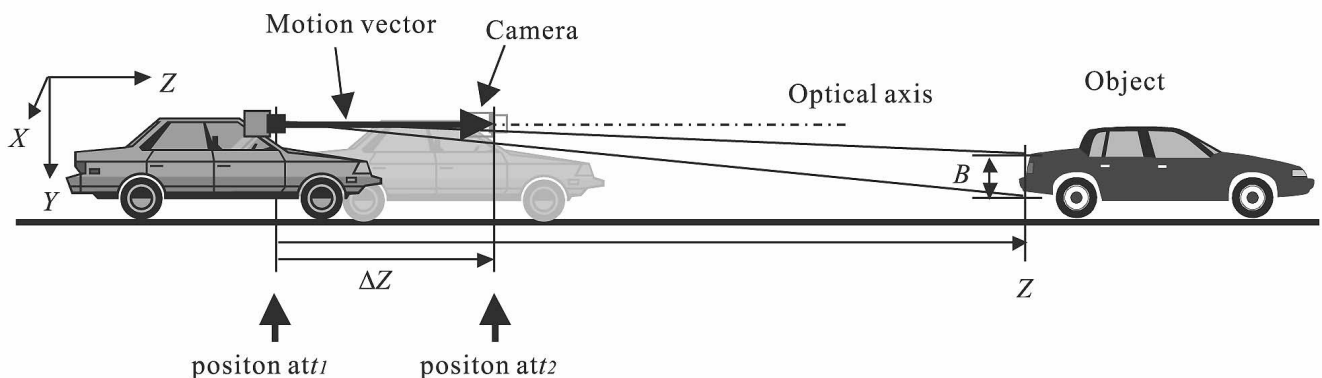


Fig. 1 Motion stereo for automotive.

だけ変化する。そこで、実際の視差変化 Δb と $\hat{\Delta b}$ を比較することによって、その点が物体上に存在するかを判定することができ、検出した点の集合が物体領域となる。

3.2 検出方法

本節では、具体的な方法を説明する。

1) カメラによって撮像された画像から特徴点を抽出し、追跡する。特徴点の追跡方法は金出らの方法⁷⁾を用いた。概要を以下に記す。まず、画像中から垂直・水平両方向ともに画素値の変化の大きい点の特徴点として選択する。次に、選択した各領域をテンプレートとするテンプレートマッチングを次のフレームの画像に対して行い、特徴点を追跡する。そして、継続するフレームに対してテンプレートマッチングによる追跡を繰り返す。

2) 全特徴点 $\{P_i\}$ から以下の式を満たすペア (P_i, P_j) を生成する。

$$W_{min} \leq b_x < W_{max}, H_{min} \leq b_y < H_{max} \quad (2)$$

ここで、 b_x と b_y はそれぞれ b の x 方向成分と y 方向成分である。また、 $W_{min}, W_{max}, H_{min}, H_{max}$ は適当な定数である。

3) 全ての生成されたペアから、レーダで検出した距離に存在する可能性の高いペアを抽出するため、以下の評価関数を満たすペアを選別する。

$$\varepsilon^2(P_i, P_j) = |\Delta b(P_i, P_j) - \hat{\Delta b}(P_i, P_j)|^2 < \theta_1 \quad (3)$$

ここで、 $b(P_i, P_j)$ はペア (P_i, P_j) の長さ、 $\Delta b(P_i, P_j)$ はその変化量である。

4) 選別されたペアを対角とする矩形領域を設定し、矩形領域内に存在する N 個の特徴点 $\{P_i | i = 1,$

..., N } から以下の式によってレーダで検出した距離に存在する矩形領域を選別する。

$$\sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon^2(P_i, P_j) < \theta_2 \quad (4)$$

5) 選別の結果残った矩形領域を全て含む矩形領域を物体の存在する領域とする。

3.3 実験結果および考察

提案手法の評価のため実際の画像を用いた動作確認を行った。実験車にカメラとレーダを搭載して走行させ記録した、画像およびレーダのデータをオフラインでPCによって処理した。カメラはソニーXC-7500, 焦点距離25mmのレンズを使用した。レーダは、富士通製メカスキャンミリ波レーダを用いた。このレーダは、距離だけでなく方位も検出できるが、今回の実験では距離情報のみを用いている。

本方法による検出結果をFig. 2およびFig. 3に示す。Fig. 2は検出例を示す画像であり、図中の×はステップ1によって検出した特徴点、線分はステップ3処理後の特徴点ペア、矩形は最終的な検出結果を示している。Fig. 3はレーダで検出した距離と画像中での物体の左右境界の座標値の変化である。Fig. 3から本方法によって安定して物体境界が検出可能なことがわかる。また、画像中における、目視による車両の左右境界と本方法によって検出した境界の差は最大5画素であった。これを距離方向の長さに変換すると約0.15mとなり、本方法によって目標とする物体境界の検出精度達成の見通しが得られた。

4. マシンビジョンと地図融合によるレーン検出

4.1 提案方法

本章では、提案したマシンビジョンとDGPSと道路地図の情報を融合する走行レーン検出手法について詳細を述べる。

Fig. 4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 $P_i = (X_{i1}, Y_{i1}) ; i = 1, 2, \dots, m$ で表し、地図上のレーン形状を点列 $Q_j = (X_{m1}, Y_{m1}) ; j = 1, 2, \dots, n$ 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。

自車両のレーンに対する位置と姿勢の初期値に基づき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、Fig. 4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合わせ、照合度が高くなるよ



(a) $t = 0, Z = 55.1 \text{ m}$



(b) $t = 20, Z = 47.2 \text{ m}$

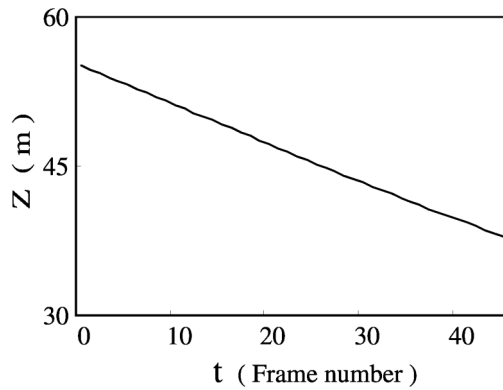


(c) $t = 40, Z = 39.7 \text{ m}$

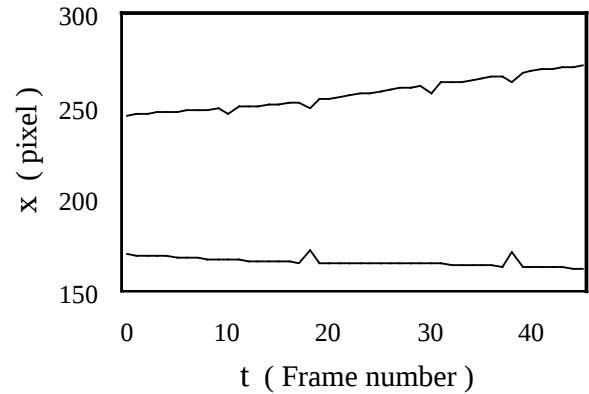
Fig. 2 Example images of detection.

うに自車両のレーンに対する位置と姿勢を補正するとともに、三次元座標の点列 $R = (X, Y, Z)$ を抽出することで、三次元レーン形状を推定できる。

本手法において、道路地図とDGPSを用いた場合に誤差が大きい自車両のレーンに対する位置と姿勢が、画像を用いることで補正される。また、画像を



(a) Distance



(b) x-coordinate of boundaries

Fig. 3 Distance and boundaries.

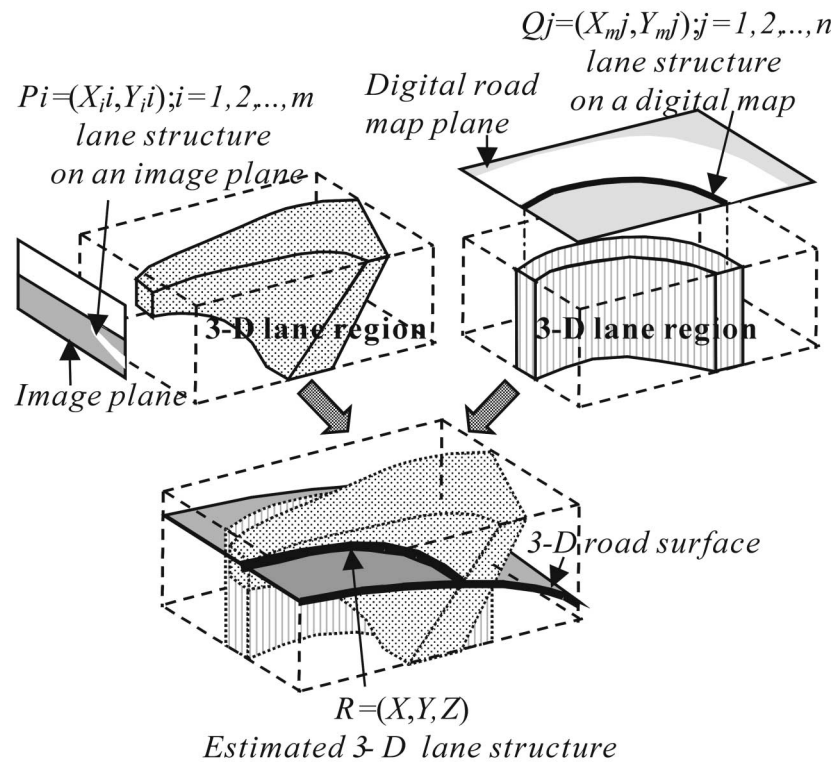


Fig. 4 Fusion of a digital map and an image.

用いた場合に誤差が大きい、勾配変化のある場合の遠方レーン形状が、地図を用いることで補正される。さらに、地図と画像の双方の三次元レーン形状の照合から進行方向位置も補正される。

4.2 レーンの三次形状推定方法

本節では三次元レーン形状推定方法を示す。

推定する形状の水平断面形状をクロソイド曲線、垂直断面形状を二次曲線であると仮定し、道路形状をパラメータで表現する。また、自車両のレーンに対する位置と姿勢もパラメータで表現する。これらのパラメータを推定することによって自車両を中心とした三次元レーン形状推定を行う。具体的には、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} 、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} とし、 E_{image} と E_{map} の線形和が最小になるようなパラメータを求めることで、画像と地図を融合したレーン形状推定を行う。

$$w \cdot E_{map} + (1-w) \cdot E_{image} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{cases} E_{map} = \frac{1}{n} \cdot \sum_j (r_{mapj})^2 \\ E_{image} = \frac{1}{m} \cdot \sum_i (r_{imagei})^2 \end{cases}$$

重み係数 $0 < w < 1$

ここで、 E_{map} は地図上のレーン形状 Q_j を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。今回は、地図と画像の信頼度は同じであるとし、 w を 0.5 とし、パラメータ探索方法については本稿では省略する。

クロソイド曲線とは、道路構造令¹⁰⁾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距離とすると、三次元道路形状は式(6)のような l の関数で示される。なお、初期中心を (C_{lox}, C_{loy}) 、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。また、自車両のレーンに対する位置姿勢を示すパラメータとして、クロソイド接線方向の進行方向を l_0 、接線方向に対する進行方向のヨー角とオフセット位置をそれぞれ ϕ_{yaw} と d 、道路面に対するピッチ角 θ_{pitch} とする。自車両の位置と姿勢を示すパラメータは E_{image} の算出に大きく関わる。

$$\begin{cases} X(l) = C_{lox} + \left[\frac{\alpha R_0^2}{(\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1)^2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) dl \right. \\ \quad \left. + \frac{R_0}{\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1} \cdot \cos\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) \right] \\ Y(l) = C_{loy} + \left[\frac{\alpha R_0^2}{(\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1)^2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) dl \right. \\ \quad \left. + \frac{R_0}{\alpha \cdot R_0 \cdot l + 1} \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot l^2}{2} + \frac{l}{R_0} + \phi_0\right) \right] \\ Z(l) = a \cdot l^2 + b \cdot l + c \end{cases} \quad (6)$$

4.3 実験結果および考察

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

4.3.1 模擬データによる検証

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。Fig. 5(a) に三次元レーン形状を上方からみた $Xm-Ym$ 平面形状を示す。ただし、自車両の実際の位置とレーンに対する姿勢は Fig. 5(a) に示す。入力となる地図情報は、1/2500 の航空写真に基づいて作成された地図を利用すると仮定して、Fig. 5(a) 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は焦点距離 9mm、撮像面 $4.92 \times 3.69mm$ 、解像度 640×480 画素のカメラから、カメラの位置と姿勢に基づいて画像面に透視投影して作成した。なお、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。

4.3.2 推定結果

Fig. 5(b) にレーン形状推定誤差を示す。原点を自車両位置とし、横軸を自車両からの距離、縦軸を推定誤差とする。提案手法による推定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、道路地図と DGPS から推定した結果をプロット点で示す。

Fig. 5(b) より、単眼画像や地図単独によるレーン形状推定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では、50m 先の推定誤差が 0.3m 以下となり、目標精度を達成できていることがわかる。

また、提案手法は垂直面の形状推定についても良好な結果が得られること、レーン形状や自車両の位置や姿勢が異なる場合にも良好な結果を得られることを確認しており¹¹⁾、提案手法は目標精度の達成が期待できる。

4.3.3 実環境での検証

次に実際の道路で提案手法を適用した結果を示す。

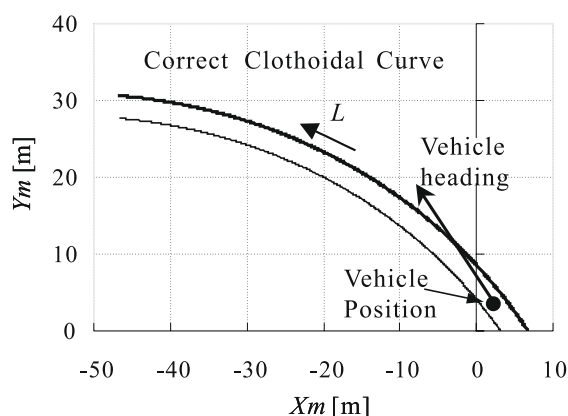
勾配変化のある道路では三次元レーン位置の真値を得ることは困難であるため、本稿ではFig. 6(a)のような平坦な道路について提案手法を適用し、推定結果は50m先のレーン位置で評価した。実測より、50m先のレーン位置は自車両の進行方向軸に対し-0.32mであった。

Fig. 6(b)に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から推定した結果は、解像度の限界により遠方では誤差が大きくなっている。道路地図とDGPSに基づく推定結果も、特に進行方向位置の誤差の影響によって、遠方での誤差が大きくなっている。この時の推定値は双方とも $X = 0.56\text{m}$ であり、正解位置に対して0.88mの誤差

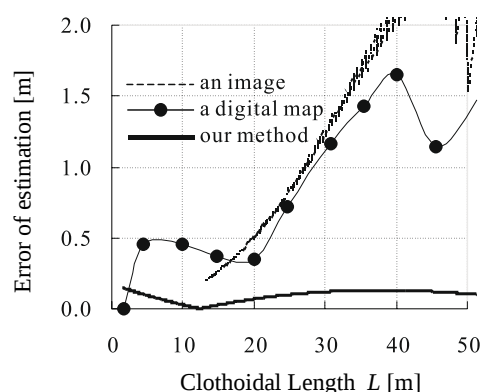
であることがわかる。それに対し、提案手法による推定結果は $X = -0.37\text{m}$ 、誤差は0.05mである。以上のように提案手法の効果を実際の道路環境下においても確認できた。

5. まとめ

一般道路での衝突防止システムを対象に、前方物体との衝突危険判断機能の実現のため、50m先の物体とレーン位置をそれぞれ0.3m以下の精度で検出するという技術目標を設定した。車載センサとして一般的に利用されているミリ波レーダ、レーザレーダ、マシンビジョンでは単独でこの機能の達成が困難なため、ミリ波レーダとマシンビジョンを融合する物体検出手法とマシンビジョンとDGPSと地図を融合するレーン検出手法を提案した。



(a) Assumed horizontal lane

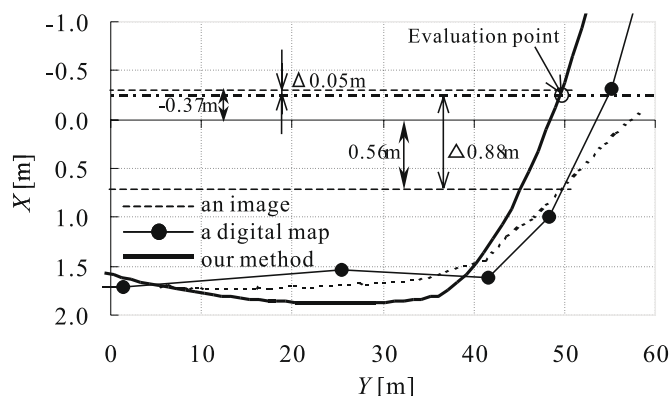


(b) Estimation error

Fig. 5 Estimation in the model shape.



(a) Sample scene



(b) Result of horizontal lane structure

Fig. 6 Estimation in the real data.

提案したそれぞれの融合型センシング手法を実際の道路環境に適用し、目標とする検出機能実現の見通しが得られた。今後は車載システムとして実装するための処理時間や低コスト化などの課題を解決する予定である。

参考文献

- 1) Langer, D. : "An Integrated MMW Radar System for Outdoor Navigation" , CMU-RI-TR, 97-03(1997), 104
- 2) DeMenthon, D. : "A Zero-bank Algorithm for Inverse Perspective of a Road from a Single Image", Proc. IEEE Int. Conf. Robot Autom., (1987), 1444
- 3) 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, 8-4(1990), 407
- 4) 佐藤淳 : コンピュータビジョン - 視覚の幾何学 -, (1999), コロナ社
- 5) Hartley, R., Zisserman, A. : Multiple View Geometry in Computer Vision, (2000), Cambridge Univ. Press
- 6) Carlsson, S., Eklundh, J-O. : "Object Detection Using Model Based Prediction and Motion Parallax", Proc. of ECCV, (1990), 297
- 7) Suzuki, T., Kanade, T. : "Measurement of Vehicle Motion and Orientation Using Optical Flow", Proc. of IEEE Int. Conf. ITS, (1999), 25
- 8) Huber, J., Graefe, V. : "Motion Stereo for Mobile Robots", IEEE Trans. Ind. Electron., 41-4(1994), 378
- 9) Shi, J., Tomasi, C. : "Good Features to Track", IEEE Conf. on CVPR, (1994)
- 10) 道路構造令, (1970)
- 11) 小島祥子, ほか2名 : "画像と地図情報の融合による道路形状推定", 信学技報, 100-508, PRMU-143, (2000), 95
(2001年5月22日原稿受付)

著者紹介



二宮芳樹 Yoshiaki Ninomiya
 生年：1958年。
 所属：センシングシステム研究室。
 分野：ITS, 走行支援システムのセンシング技術の研究・開発。
 学会等：電子情報通信学会，日本ロボット学会会員。
 1996年日本映像処理研究会特別賞受賞。



加藤武男 Takeo Kato
 生年：1966年。
 所属：センシングシステム研究室。
 分野：主に障害物の検出を目的とした車載センサのアルゴリズムの研究・開発。
 学会等：1996年日本映像処理研究会特別賞受賞。



小島祥子 Yoshiko Kojima
 生年：1970年。
 所属：センシングシステム研究室。
 分野：車両周辺監視技術の研究。
 学会等：電子情報通信学会会員。