

ステレオ動画像を利用した平面領域抽出による障害物検出

関 晃 仁[†] 奥 富 正 敏[†]

本論文では、車載ステレオカメラを使った道路平面の障害物検出手法を提案する。まず、ステレオ動画像を用いて、画像間の射影変換を求めると同時に、空間中の道路平面部分に対応した領域を抽出する。次に射影変換行列を特異値分解することで、抽出した道路平面の法線ベクトルを算出する。その法線ベクトルを利用して入力画像と抽出した平面領域画像を、仮想的に道路平面を上方から見た画像に変換する。その画像を利用して道路平面領域とその時間的変化を求めることにより、空間中の障害物の位置と相対速度の検出を行う。また平面の傾きに対する射影変換行列の収束性に関して検討し、それを元に射影変換行列推定時の初期値を定めることで、処理のロバスト性を向上させている。最後に、車載カメラによる実画像を用いた実験を通じて、本手法の有効性を示す。

Extraction of Planar Region and Obstacle Detection Using Stereo Images

AKIHITO SEKI[†] and MASATOSHI OKUTOMI[†]

In this paper, we propose the method for an obstacle detection on the road plane using the stereo cameras mounted on a vehicle. We first estimate planar regions using projective transformation matrix. By singular value decomposition of the matrix, we get the normal vector of the planar regions and the distance from the optical center of the primary camera to the plane. Then, we make a virtual projection plane (VPP) image which is equivalent to the top view of the road scene. Obstacles are detected by checking the change of the planar regions using the VPP image. Finally, we present the experimental results of obstacle detection with our method.

1. はじめに

車載カメラを使った障害物検出において、視覚による走行環境の認識、特に障害物の存在しない走行可能な領域の検出は、重要な技術であり、さまざまな手法が提案されている。それらは、単眼による方法と、複眼を用いる方法に分けることができる。

まず単眼を用いるものは、主に高速道路などの整備された環境において、路面の白線などを検出することにより、走行領域を検出したり^{2),5),6)}、障害物検出においては、路面の動きをオプティカルフローを用いて推定し、路面の動きと異なるものを障害物領域として検出したりする方法¹²⁾があるが、障害物と路面のフローを安定に求めることが難しかったり、小さい物体についてはノイズが障害物か判断ができなかったりするといった問題があった。また、道路平面上にある水平エッジと障害物上にある水平エッジの複比を比較す

ることで障害物を検出する方法⁷⁾などが提案されている。しかし、単眼による方法では対象やカメラ配置に関する何らかの仮定を設けない限り、障害物までの距離を求めることができない。

一方、複眼による方法、すなわちステレオ画像を利用する方法では、原理的には環境の3次元構造を直接利用できるため、より安定に走行環境を認識できる可能性がある。たとえば、画像中での視差から道路面と障害物とを分離する方法が提案されている^{3),4),13)}。しかし、これらの方法はステレオ画像間の対応点探索の計算コストが大きく、探索ミスも多いという問題があった。また走行可能な領域は空間中ではほぼ平面であると見なせることから、画像を2次元射影変換し、各画像の重なり具合から、平面か否かを検出するという方法が提案されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。そこで、本論文ではこの手法を利用する。この手法では道路面に対する射影変換行列を動的に算出することで、平面領域を抽出するが、その射影変換行列の初期値に適切なものを与える必要がある。そこで、本論文では初期値に関する実験を通じた考察を行うことで射影変換行列の推定

[†] 東京工業大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

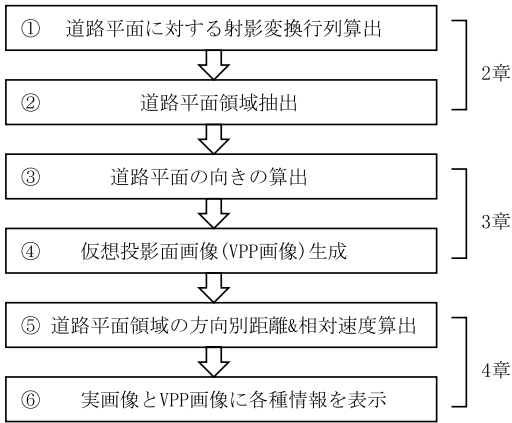


図 1 本論文の手法の処理全体図
Fig. 1 Overall view of our method.

のロバスト性を高める手法について提案する。さらに、本論文では平面領域を利用した障害物検出手法について提案する。提案する障害物検出手法は、画像間の対応点探索を行わずに平面どうしの対応を利用するため、計算コストがそれほど大きくない。にもかかわらず道路平面を仮想的に上方から見た画像を生成することで障害物までの距離を求めることができ、かつ障害物の危険度を計測するのに、障害物のトラッキング作業を必要としないといった特徴を持つ。

図 1 は提案手法の全体図と本論文各章の構成を示している。実験環境として、車両にカメラを 2 台前方に向けてほぼ平行配置で設置する。それらの画像を基準画像、参照画像とし、その時系列画像を利用する。まず、文献 8), 9) の手法を利用して道路平面を抽出する処理を行う。そのために、①で道路平面に対する射影変換行列を動的に算出する。ここで、新たに平面に対する射影変換行列のロバスト性を向上させる処理を提案する。そして②で道路平面領域を抽出する(以上本論文 2 章)。次に、道路平面を仮想的に上方から見た画像(VPP 画像)を生成するため、③で道路平面の射影変換行列を分解することで道路平面の向きを算出し、④で VPP 画像を生成する(以上本論文 3 章)。さらに、障害物を検出するために、⑤で平面領域を VPP 画像に変換した画像から平面領域の方向別の距離と速度を求める。⑥では、これまでの処理で得られた情報を実画像および VPP 画像上に同時に表示する(以上本論文 4 章)。最後に本論文 5 章において、車載カメラから撮影された実画像を使い、本手法を適用した障害物検出の実験結果を示す。

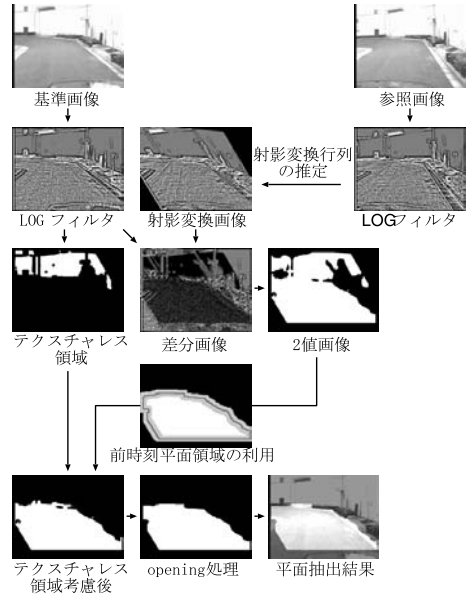


図 2 平面抽出の処理全体図
Fig. 2 Extraction process of planar region.

2. 道路平面抽出

2.1 処理の概要

本節では、画像中から道路平面を抽出する処理を説明する。この処理は基本的に文献 8), 9) に提案されている処理を利用するため、ここでは概略のみ述べる。図 2 は平面抽出処理の全体図である。まず、基準画像と参照画像を入力し、左右の画像の輝度を一致させるため、LOG フィルタを施し、ヒストグラム平坦化をしてコントラストを上げる。次に道路平面に対する射影変換行列を動的に推定する。その射影変換行列で参照画像を変形し、基準画像との輝度差をとる。平面部分は完全に重なるので、参照画像の平面上にある点は基準画像に変換したときに完全に重なり、その輝度差は小さくなる。平面判定を行うためには輝度差の閾値を用いて決定する。またテクスチャのない領域では、平面上にない点であっても変換後、輝度差がなくなる可能性があるため、別途処理を加える。最後に Opening 処理を行い、小領域を除去する。

2.2 射影変換行列推定のロバスト性の向上

提案手法では、道路平面に対する射影変換行列を推定するために、 $I_i(\vec{m})$ を画像 i の同次座標で表した

テクスチャレス領域ごとにラベリングし、領域ごとに基準画像と参照画像で射影変換行列を使ってマッチングを行い、マッチング結果が完全に平面内に収まっていると判定される領域は道路領域とし、ずれが生じている領域は非道路領域とする。

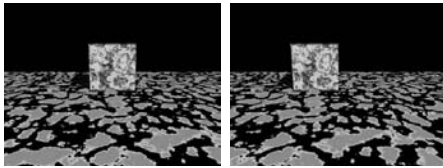


図 3 合成画像

Fig. 3 Synthesized images.

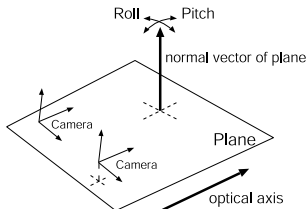


図 4 平面のピッチ角とロール角

Fig. 4 Pitch and roll angle of plane.

位置 $\tilde{\mathbf{m}}$ での輝度値, \mathbf{H} を画像間の平面部に対応した射影変換行列としたとき, 式 (1) で示すように,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{H}} &= \arg \min_{\mathbf{H}} e(\mathbf{H}) \\ &= \arg \min_{\mathbf{H}} \sum_{\tilde{\mathbf{m}}_b \in R} \{ \mathbf{I}_r(\mathbf{H}\tilde{\mathbf{m}}_b) - \mathbf{I}_b(\tilde{\mathbf{m}}_b) \}^2 \quad (1) \end{aligned}$$

平面領域推定範囲内 ($\tilde{\mathbf{m}}_b \in R$) の基準画像 \mathbf{I}_b と参照画像 \mathbf{I}_r を射影変換行列 \mathbf{H} で変換した画像との輝度差の 2 乗を評価関数 $e(\mathbf{H})$ として, これを最小にする射影変換行列 $\hat{\mathbf{H}}$ を求めている¹¹⁾.

2.2.1 射影変換行列推定の初期値に対するロバスト性

上に述べた手法では, 繰返し計算のための適当な初期値を必要とする. 平面の射影変換行列は式 (2) のように構成される. カメラが固定されている場合, 平面の法線ベクトル \mathbf{n} と平面までの距離 d が変数となるが, d は車載カメラの場合, ほとんど変動はしない. そこで, 法線ベクトル \mathbf{n} の変動に対する平面抽出結果を調べることで平面抽出のロバスト性を確かめるシミュレーション実験 (用いた画像は, 図 3 に示す合成画像であり, 後述する車載カメラと同様な平行ステレオ配置を想定している) を行った.

平面領域に対する真の射影変換行列を 3.1 節で述べる特異値分解を使って分解し, それによって得られる平面の法線ベクトル \mathbf{n} を図 4 のように, カメラの光軸に対してピッチ, ロール方向に傾けた法線ベクトル

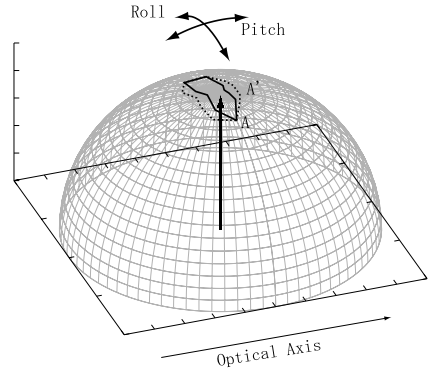


図 5 平面抽出における法線ベクトルのロバスト性

Fig. 5 Robustness of normal vector in extraction of planar region.

を作成し, それを使って射影変換行列を再構成し, 射影変換行列の初期値とした.

結果は, 図 5 であり, 原点 O から垂直に伸びるベクトル \mathbf{n} を真の平面の法線ベクトルとすると, 同図の領域 A に平面の法線ベクトルが収まる時, 平面を正しく抽出できたことを示している. 初期値における平面の法線ベクトルのずれが, カメラの光軸方向に対してピッチ方向は $2 \sim -5^\circ$, ロール方向に対しては $20 \sim -16^\circ$ の範囲で正しい射影変換行列の推定ができ, ピッチ方向に対するロバスト性が低いことが確認された. 他の画像に対しても同様の実験を行ってみたが, ロール方向よりピッチ方向の方がロバスト性が悪いことが確認された.

2.2.2 射影変換行列推定の安定化

車載カメラにより道路を撮影する場合, カメラに対する道路平面の傾きはある程度の拘束を設けることができる. また 2.2.1 項で述べた, 射影変換行列の初期値の性質を考慮し, 平面の法線ベクトルをピッチ方向に変えた射影変換行列を複数用意し, それらを初期値として利用することで, 初期値に対するロバスト性を向上させる. まずはじめに基準となる射影変換行列 \mathbf{H}_0 を得るため, 水平な道路上に駐車した車両から撮影した画像から, 道路平面内の 4 点以上を手動で与え, 最小 2 乗法により求める. これは車載するカメラの配置が変わらなければ同じものを利用してかまわないため, カメラを設置後に一度だけ行えばよい. 次に射影変換行列 \mathbf{H}_0 を 3.1 節に述べる方法で特異値分解し, ステレオカメラ間の回転行列 \mathbf{R} , ベースラインベクトル \mathbf{t} , 平面の法線ベクトル \mathbf{n}_0 , カメラと平面の距離 d を算出する. さらに平面の法線ベクトル \mathbf{n}_0

前時刻に推定した平面領域が存在する場合は, その領域を計算領域に指定し, 最初のスタート時は道路平面が画像中で出現が予想される部分を計算領域として指定する.

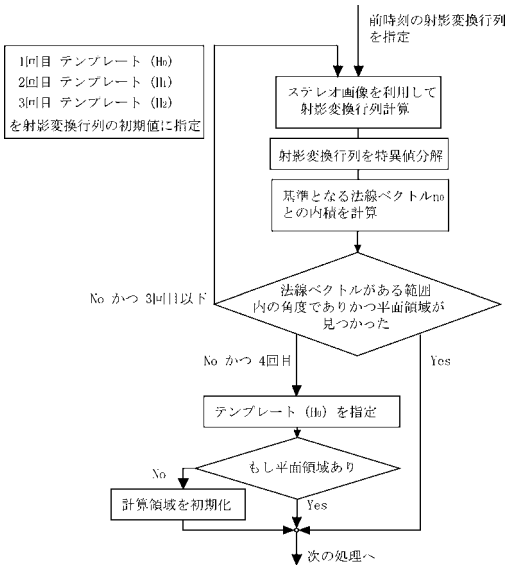


図 6 射影変換行列安定化処理の流れ

Fig. 6 Flow chart of stabilization process of projection matrix.

をピッチ方向前後に 4° 傾けた法線ベクトル n_1, n_2 を求め、先ほど求めた R, t, d を使って射影変換行列 H_1, H_2 を再構成する．ここで、基準となる射影変換行列 H_0 とピッチ方向前後に動かしてできた射影変換行列 H_1, H_2 の 3 つを初期値のテンプレートとして用意する．

次にその後の処理過程を図 6 を使い、説明する．

- (1) 平面抽出処理の最初のスタート時は前時刻の射影変換行列が存在しないため、射影変換行列 H_0 を初期値とする．前時刻に推定した射影変換行列が存在する場合はそれを初期値とする．
- (2) ステレオ画像から射影変換行列を計算する^{8),9)}．次に求めた射影変換行列を特異値分解して、道路平面的法線ベクトルを求め、射影変換行列 H_0 から求めた法線ベクトル n_0 と内積を計算してある範囲内に収まり、かつ平面領域が見つかるときは、その射影変換行列は正しい平面を発見できたと見なす．それ以外ときは、誤ったローカルミニマムに陥ったと見なし、次の射影変換行列のテンプレートを初期値として同様に計算する．ここでの処理は、得られた射影変

ピッチ方向に傾けた射影変換行列のカバーする範囲を考えると、たとえば H_0 のピッチ前方向のカバーする範囲は H_1 のピッチ後方向のカバーする範囲にオーバーラップすればよいので、ピッチ方向前後に収束範囲の差があっても別の射影変換行列でカバーするので、ピッチ前後の変化量は同じ角度でよい．またピッチ方向のカバーする範囲が $2^\circ \sim 5^\circ$ と 7° であり、余裕をみて 4° と設定した．

換行列を検証しつつ推定を行っていることに相当する（射影変換行列の分解に関しては 3.1 節を参照）．

- (3) すべてのテンプレートを計算しても正しい平面が見つからない場合は、その画像中に平面は存在していないと見なし、射影変換行列と計算領域をリセットし、ここでの処理を終え、次の処理へと進む．この処理により、平面領域が存在しないときに推定が誤った方向に発散することを防ぎ、また平面領域が再出現した場合にも回復できる機能を持つこととなる．

以上の手法を利用することにより、合成画像を利用して射影変換行列の初期値に対するロバスト性を確かめたところ、図 5 の A' の範囲となり、ピッチ方向の収束範囲は、 $6 \sim 9^\circ$ となり、カバーできるピッチ角の範囲が 7° から 15° に向上していることが確認された．実画像実験の結果も 5 章で示す．

提案手法では、射影変換行列の初期値に対するロバスト性がピッチ方向に悪いことから、ピッチ方向に複数の初期値を用意することで発散や異なったローカルミニマムに陥りにくくなるとともに、求められた射影変換行列を分解することで得られる平面的法線ベクトルの妥当性と、平面領域の面積から射影変換行列の正誤を判断するといった特徴を持つ．

この手法を適用することで、スタート時や前時刻の推定値が利用できる場合にも、射影変換行列推定のロバスト性が増し、また射影変換行列の誤りを検出できるようになったことで異なったローカルミニマムに陥りづらくなり、かつ、回復機能を備えることで全体が壁などで道路平面が映らなくなっても、再び道路領域が出現すると自動的に道路平面を抽出できるよう改善され、全体として処理のロバスト性が向上した．

3. 仮想投影面画像生成

本章では、ステレオ画像間の平面に対する射影変換行列から、平面的向きを算出し、それを利用して図 7 のように道路平面と平行な仮想投影面画像を生成する．本論文では、これを VPP (Virtual Projection Plane) 画像と呼ぶことにする．

このような画像の生成法として、他にも道路白線の平行性を仮定する手法もあるが、提案手法では路面パターンの拘束が必要ないため、より汎用的な手法であると考えられる．

3.1 射影変換行列の特異値分解

本節では文献 1) に述べられている方法を基に、射

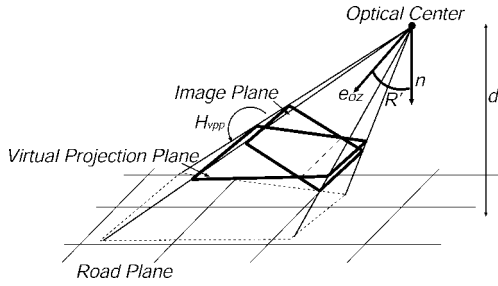


図 7 VPP 画像の幾何学的関係
Fig. 7 Geometry of VPP image.

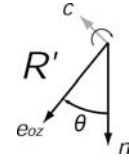


図 8 \mathbf{n} , \mathbf{e}_{oz} と θ の関係
Fig. 8 \mathbf{n} , \mathbf{e}_{oz} and θ .

射影変換行列から平面の姿勢を表すパラメータである平面までの距離 d と平面の法線ベクトル \mathbf{n} を求める方法について簡単に説明する。

本論文では、基準カメラと参照カメラの内部パラメータとカメラ間のベースライン長が既知であるとする。

まず、射影変換行列は以下のような関係がある。

$$\mathbf{H} = k\mathbf{A}_2 \left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{t}\mathbf{n}^t}{d} \right) \mathbf{A}_1^{-1} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{R} はカメラ間の回転行列、 \mathbf{t} はカメラ間のベースラインベクトル、 d は基準カメラの光学中心と平面までの距離、 \mathbf{n} は平面の法線ベクトル、 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 はそれぞれ基準カメラと参照カメラの内部パラメータ行列、定数項 $k \neq 0$ を付けるのは、画像から得られた射影変換行列には定数倍の自由度が存在することを表す。

カメラの内部パラメータ行列 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 が既知であると、文献 1) の手法によって、式 (3) のように射影変換行列 \mathbf{H}' を特異値分解できる。

$$\mathbf{H}' = \mathbf{A}_2^{-1}\mathbf{H}\mathbf{A}_1 = k\left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{t}\mathbf{n}^t}{d}\right) = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^t \quad (3)$$

$$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 > 0)$$

\mathbf{t}/d 、 \mathbf{n} は以下のような関係式から求めることができる。

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{t}}{d} = \mathbf{U}\frac{\mathbf{t}'}{d} \\ \mathbf{n} = \mathbf{V}\mathbf{n}' \end{cases} \quad (4)$$

ただし $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ のとき、

$$\mathbf{n}' = \begin{pmatrix} n'_1 \\ n'_2 \\ n'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \sqrt{\frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 - \sigma_3^2}} \\ 0 \\ \epsilon_3 \sqrt{\frac{\sigma_2^2 - \sigma_3^2}{\sigma_1^2 - \sigma_3^2}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$(\epsilon_{1,3} = \pm 1)$

$$\frac{\mathbf{t}'}{d} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_2} \begin{pmatrix} n'_1 \\ 0 \\ -n'_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$\epsilon_{1,3}$ を決定するには、2 台のカメラから平面が見えているという条件を加える。すなわち、 \mathbf{n} と $\hat{\mathbf{m}}_b$ との内積が正になる。これで、解が 2 つに減る。次に、それぞれの \mathbf{n} について、求めた \mathbf{t} と、実際のカメラ配置のおおまかな並進ベクトルである $\hat{\mathbf{t}}$ (ここでは基準カメラが参照カメラの右側にあるので、 $\hat{\mathbf{t}} = (1, 0, 0)$) との内積を計算し、1 に近いほうの \mathbf{t} を \mathbf{n} の解とすればよい。

次に d を求めるには、得られた \mathbf{t}/d の絶対値と $|\mathbf{t}|$ から次の式より求めることができる。

$$d = \frac{|\mathbf{t}|}{\left| \frac{\mathbf{t}}{d} \right|} \quad (7)$$

つまり、カメラ間のベースライン長 $|\mathbf{t}|$ を与えることで求まる。

3.2 VPP 画像の生成

得られた平面の法線ベクトルと平面までの距離を基に、道路平面を上方から観察し、かつカメラ光軸の VPP 画像上での方向が画像の縦軸に一致するような画像 (VPP 画像) を生成する。この画像は、道路平面を上方から平行に見た画像となっているため、VPP 画像中での奥行きと幅は空間の実座標に対応したものとなる。

次に VPP 画像の生成法を述べる。まず、3.1 節で述べたように射影変換行列を分解することで得られる平面の法線ベクトルを \mathbf{n} とする。基準カメラの光軸 \mathbf{e}_{oz} と \mathbf{n} との外積を回転軸として \mathbf{e}_{oz} と \mathbf{n} のなす角を θ 回転させる変換行列を \mathbf{R}' とすると (図 8)、式 (8) のように表せる。

$$\mathbf{R}' = \begin{pmatrix} c_1^2 \alpha + \cos \theta & c_1 c_2 \alpha - c_3 \sin \theta & c_1 c_3 \alpha + c_2 \sin \theta \\ c_1 c_2 \alpha + c_3 \sin \theta & c_2^2 \alpha + \cos \theta & c_2 c_3 \alpha - c_1 \sin \theta \\ c_1 c_3 \alpha - c_2 \sin \theta & c_2 c_3 \alpha + c_1 \sin \theta & c_3^2 \alpha + \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\alpha = (1 - \cos \theta)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{n} \times \mathbf{e}_{oz} = (c_1, c_2, c_3)^T$$

$$\cos \theta = \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_{oz} \quad (8)$$

基準カメラをこの \mathbf{R}' により回転させた VPP 画像へ

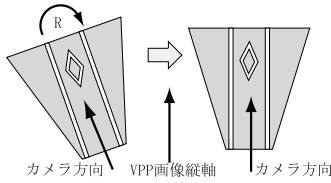


図 9 VPP 画像の回転
Fig. 9 Rotation of VPP image.

変換する射影変換行列は基準カメラの内部パラメータ行列を A ，仮想カメラの内部パラメータ行列を A_{vpp} とすると，

$$H' = A_{vpp} R' A^{-1} \quad (9)$$

と表せる．この変換により，道路平面を上方から撮影したような画像が得られる．

次に 図 9 のように VPP 画像の縦軸と基準カメラの光軸の向きを一致させる．基準カメラの光軸方向の単位ベクトル $e_{oz} = (0, 0, 1)^T$ を VPP カメラ座標系から見たベクトル u を考え，それを VPP 画像座標系に正射影したベクトル v を考える．

まず，

$$u = R' e_{oz} \quad (10)$$

である．

次に u の x 成分を u_x ， y 成分を u_y と表すとき， u を x - y 平面に正射影した $u' = (u_x, u_y, 0)^T$ なるベクトル u' を考える．

この u' を VPP 画像座標に射影すると，同次 VPP 画像座標上での無限遠点 $\tilde{v} = (v_x, v_y, 0)^T$ に変換される．

$$\tilde{v} = A_{vpp} u' \quad (\text{ただし, } \|\tilde{v}\| = 1) \quad (11)$$

と \tilde{v} を定義し，これをカメラ方向と呼ぶ．求める回転行列 R はカメラ方向 \tilde{v} を「VPP 画像座標の $-v$ 方向」＝「VPP カメラ座標系の $-y$ 方向」に一致させる回転変換であるので，

$$(0, -1, 0)^T = R \tilde{v} \quad (12)$$

を満たす R を求める．先ほどの H' と組み合わせることにより，基準画像から VPP 画像への射影変換行列 H_{vpp} は，

$$H_{vpp} = R H' \quad (13)$$

となる．

4. 平面抽出を利用した障害物検出

これまでで述べた方法によって，道路平面に対する射影変換が求まり，それによって平面領域の抽出ができ，その射影変換行列を分解することで得られる要素から VPP 画像が生成できる．図 10 を入力画像とするとき，図 11 の (A) に抽出された平面領域を示し，(B)



参照画像 基準画像

図 10 入力画像

Fig. 10 Input images.



(A) 抽出された平面領域 (B) 平面領域抽出結果

図 11 平面領域抽出結果

Fig. 11 Extracted planar region.

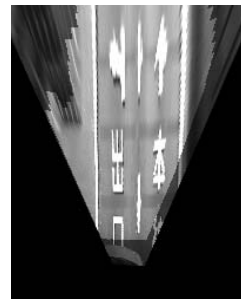


図 12 平面抽出結果の VPP 画像

Fig. 12 VPP image with planar region.

にその平面領域を原画像に合成した結果（画像中の明るい領域が平面領域）を示している．さらに，図 11 の (B) を VPP 画像に変換した画像を図 12 に示す．

次に，障害物検出手法について説明する．障害物は，平面領域以外のところに存在すると考えられるため，VPP 画像上でのカメラ位置からの非平面領域までの距離，ならびに時系列画像を利用した相対速度を求めることで障害物の検出を行う．

4.1 平面領域の方向別距離と相対速度算出

道路平面領域の変化を求めるために，VPP 画像を利用して光軸から一定角度ごとの傾きを持った方向別の平面領域の端点までの距離（方向別距離）とその方向の端点までの距離の変化（方向別相対速度）を求める方法を述べる．

平面領域の方向別距離を求めるには，図 13 のように平面領域を VPP 画像に変換した画像を用意する．次に，基準カメラの光学中心を VPP 画像に投影した

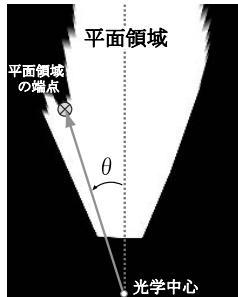


図 13 平面の方向別距離計測

Fig. 13 Distance of planar region for every directions.

点を VPP 画像の光学中心とすると、この光学中心から光軸に対して θ 傾いた直線を伸ばし、平面領域の端を計算する。この端が方向別の平面の広がり endpoint である。また、画像上での長さは仮想カメラの内部パラメータと基準カメラの光学中心から平面までの距離を使うことで実際の距離に変換できる。これによって、光学中心から方向別の平面の endpoint までの距離、すなわち方向別距離が算出できる。

次に平面領域の方向別相対速度を求める。画像は 1 フレーム $1/30$ [sec] の間隔で撮影される。そこで、1 フレームごとの方向別距離を過去の 5 フレーム分利用し、最小 2 乗法を使って傾きを求めることで速度を計算する。この速度は光軸からの各方向ごとの平面の拡大収縮速度であり、方向別相対速度と呼ぶことにする。

4.2 実画像と VPP 画像に情報表示

図 16 に実験結果の出力例をあげる。画像の左側は実画像に平面領域と平面領域の方向別距離、相対速度を同時に表示したもので、平面領域を緑色で表し、平面領域の端に点を表示している (図中 A)。この点の色は、平面の方向別相対速度が負 (平面が縮む、カメラに向かってくる方向) の場合は危険度があるため、暖色系の色で表示し、相対速度が正 (平面が広がる、カメラから離れる方向) の場合は危険度は低くなるため寒色系の色、相対速度が零の場合は緑で表示することとした。また光軸から一定角度ごとの点の上にその点の光学中心からの距離をメートル単位で表示している (図中 B)。また左側の下にあるグラデーション (図中 C) は平面領域の方向別相対速度によって変わる、点の色の推移を示す。

画像の右側は、基準画像を VPP 画像に変換したもので、同様に緑色の領域は平面領域、各点は領域の方向別の endpoint (図中 D) を表し、色の付け方は左側と同じである。また光学中心からの一定距離を 5m ごとに描き (図中 E)、カメラを搭載した車の幅を赤いライ



基準画像と射影変換した参照画像の差分画像 平面抽出結果 (平面領域が抽出されていない)

図 14 安定化処理手法適用以前

Fig. 14 Not using stabilization method.



基準画像と射影変換した参照画像の差分画像 平面抽出結果 (明るい領域が抽出された平面領域)

図 15 安定化処理手法適用後

Fig. 15 Using stabilization method.

ン (図中 F) で示している。

5. 実験結果

本論文での手法の有効性を確認するため、車載カメラによって撮影したステレオ動画画像を利用して、本手法を適用した結果を示す。

5.1 射影変換行列推定の安定化処理

まず、2.2.2 項で述べた射影変換行列推定の初期値に対する安定化処理により改善される例を示す。車両が位置している平面と前方の平面の向きがピッチ方向に異なる画像に対して、提案した安定化処理手法を用いずに射影変換行列を推定した結果が図 14 である。射影変換行列がローカルミニマムに落ち込んでしまい、平面領域がまったく抽出されていない。一方、安定化処理手法を適用した結果が図 15 である。初期値にピッチ方向に異なる射影変換行列を持つことにより、ローカルミニマムに陥りにくくなり、平面が正しく抽出できている。

5.2 障害物検出

次に、障害物検出結果について示す。本実験において、撮影した画像の解像度などの制約上、光学中心から光軸方向に 32m までを VPP 画像に変換し、平面領域を計測できる上限とした。平面領域の方向別距離と相対速度の計測範囲は光軸から 25 度の範囲で 0.5 度刻みとした。

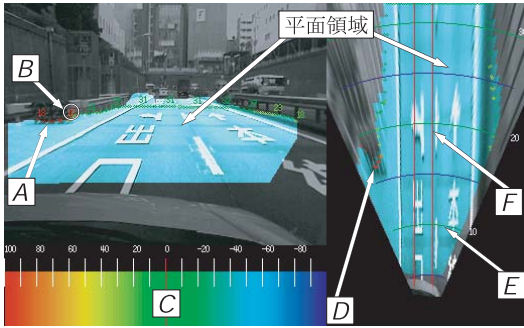


図 16 結果表示例
Fig. 16 Example of the results.

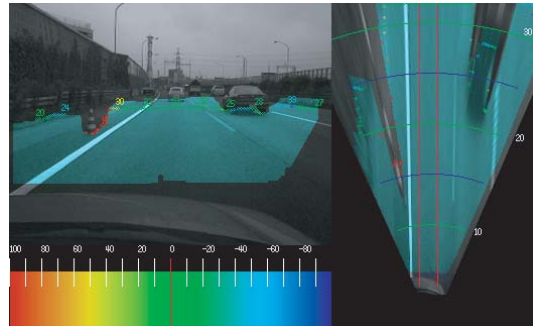


図 17 高速道路における障害物検出結果
Fig. 17 Obstacle detection results in highway.

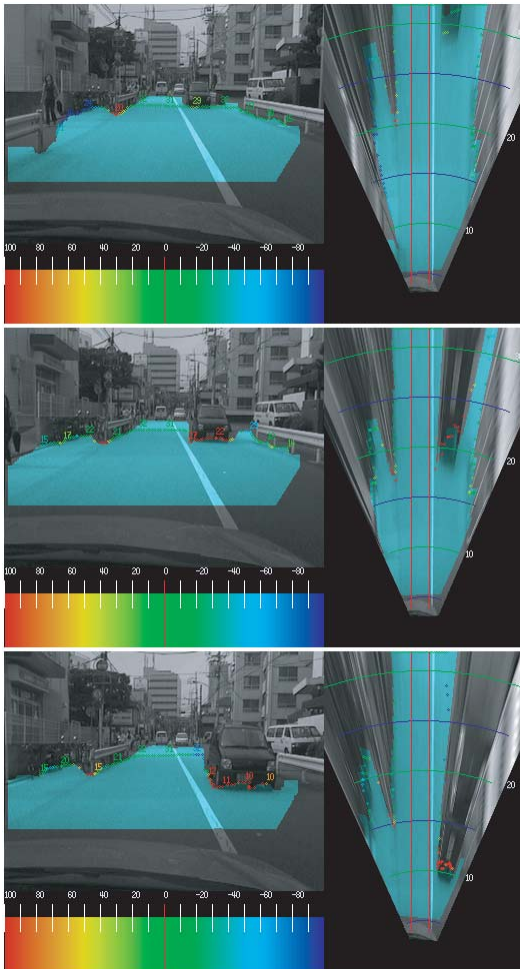


図 18 市街地における障害物検出連続結果 1 (上から 9 フレーム (3/10 秒) おきに表示)
Fig. 18 Obstacle detection sequential results 1 in urban area.

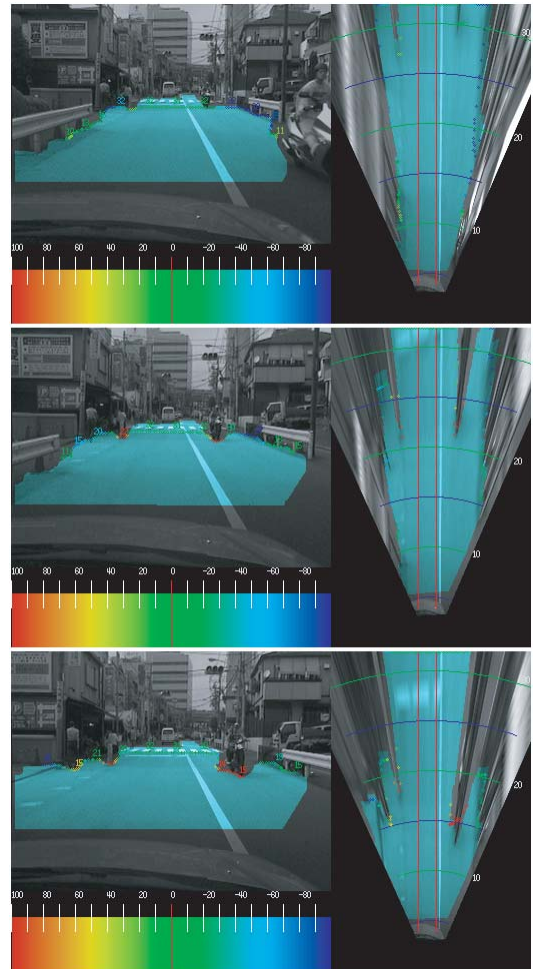


図 19 市街地における障害物検出連続結果 2 (上から 9 フレーム (3/10 秒) おきに表示)
Fig. 19 Obstacle detection sequential results 2 in urban area.

まず図 17 は高速道路においての実験結果であり、自車は 100 km/h 程度の速度で走行している。車の左側に存在するパイロンにより平面領域が削られること

で、カメラに向かって平面領域が狭まることにより、平面は縮まるので暖色系の色で表示されている。次に図 18 は、市街地を走る車から撮影された画像を処理

したもので、自車速度は 50 km/h ほどである。一番上の画像では、対向車によって平面領域が縮むため、対向車の先端付近が危険度の高い、暖色系の色になっているのが確認される。また道路左側のガードレール先端部分も平面領域が縮まっていると計測され、暖色系の表示となっている。ガードレールの側方が特に危険度が高いと検出されないのは、平面の方向別相対速度が変わらないためであり、仮に車両がガードレールに向かう方向の場合にはガードレールにより前方の平面領域が狭まると計測されるため、危険度が高いと計測される。図 19 も市街地を走行しているシーンで、対向車線をバイクが走行してくる。バイクの前輪により平面が削られるため、対向車と同じように平面が縮まる方向に検出され、危険度が高いと検出されている。道路左側に存在する短いガードレールも同様に自車に対して近付くので、平面が削られ、危険度が高いと計測される。

計算時間は、Intel Pentium4 (3 GHz) × 1 の汎用パーソナルコンピュータを利用して、1 フレーム (2 枚の 320 × 240 pixel のステレオ画像) あたり約 0.3 秒ほどの処理時間を要している。

6. おわりに

本論文では、ステレオ動画画像を用いて、画像中から空間中での平面部を検出し、その平面に対する射影変換行列を分解することで、平面の法線ベクトルを得、それを利用することで、平面を上方から仮想的に見た画像 (VPP 画像) を生成し、非平面までの距離を時系列で利用することで障害物検出をする手法を提案した。この障害物検出手法は障害物に対する危険度の評価ができるにもかかわらずトラッキング作業を行わないというメリットもある。

本手法は高速道路などの整備された環境以外にも、市街地などの複雑な環境下においても有効であり、かつ画像を利用することで、広い範囲の検出が可能となった。また VPP 画像を生成することで、実座標に対応した画像を生成できるため、白線検知や道路面の標識認識などの処理に利用できるものと考えられる。

今後の課題として、車両の下など平面が見えている領域は障害物が実際より遠くに検出されてしまうため、そのような場合に対する処理を加える必要がある。

謝辞 本研究を進めるにあたり、研究基盤を開発された東京工業大学大学院卒の原智章氏、長谷川雄一氏、中野勝之氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Faugeras, O.D. and Lustman, F.: Motion and structure from motion in a piecewise planar environment, *PAMI*, Vol.2, No.3, pp.485–508 (1988).
- 2) Kang, D.J., Choi, J.W. and Kweon, I.S.: Finding and tracking road lanes using line-snakes, *Proc. IEEE IV* (1996).
- 3) Labayrade, R. and Aubert, D.: In-vehicle obstacle detection and characterization by stereovision, *Proc. In Vehicle Cognitive Computer Vision Systems*, pp.13–19 (2003).
- 4) Labayrade, R., Aubert, D. and Rarel, J.-P.: Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through “v-disparity” representation, *Proc. IEEE IV* (2002).
- 5) 中山啓満, 窪田 進, 谷口恭弘, 小野口一則: 逆投影画像上での候補追跡処理による白線検出, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, pp.15–22 (2001).
- 6) 二宮芳樹, 高橋 新, 太田充彦: 高速パターン照合手法とレーン検出への応用, 第 5 回画像センシングシンポジウム, pp.331–334 (1999).
- 7) Okada, R., Taniguchi, Y., Furukawa, K. and Onoguchi, K.: Obscale detection using projective invariant and vanishing lines, *Proc. ICCV*, pp.330–337 (2003).
- 8) 奥富正敏, 中野勝之, 丸山純一, 原 智章: ステレオ動画画像を用いた視覚誘導のための平坦部の連続推定, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.4, pp.1061–1069 (2002).
- 9) Okutomi, Nakano, Maruyama and Hara: Robust estimation of planar regions for visual navigation using sequential stereo images, *Proc. IEEE ICRA*, pp.3321–3327 (2002).
- 10) Okutomi and Noguchi: Extraction of road region using stereo images, *Proc. ICPR*, pp.853–856 (1998).
- 11) Shum, H.-Y. and Szeliski, R.: Panoramic image mosaics, *Microsoft Research MSR-TR-97-23* (1997).
- 12) 吉沢博一, 松田一朗, 伊東 晋: 道路領域の予測に基づいた車載カメラ映像からの車両検出, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, pp.21–26 (2001).
- 13) Yu, Q., Araujo, H. and Wang, H.: Stereo-vision based real time obstacle detection for urban environments, *Proc. ICAR*, pp.1671–1676 (2003).

(平成 16 年 3 月 1 日受付)

(平成 16 年 9 月 11 日採録)



関 晃仁

2000年東京工業大学入学。2003年同大学工学部制御システム工学科中退。2004年9月東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻修士課程修了。同年10月同大学院理工学研究科機械制御システム専攻博士課程入学。



奥富 正敏（正会員）

1981年東京大学工学部計数工学科卒業。1983年東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年キャノン（株）入社。1987年～1990年カーネギーメロン大学コンピュータサイエンス学科客員研究員。1994年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻助教授。2002年東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授。コンピュータビジョン、画像処理、画像計測に関する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会、画像電子学会、IEEE各会員。
