

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

東京工業大学 大学院理工学研究科

本論文では、車載ステレオカメラを使った道路平面上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变化を求めることにより、空間中で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の検証を通じて、本手法の有効性を示している。

Extraction of Planar Region and Obstacle Detection Using Stereo Images

Akihito Seki Masatoshi Okutomi

Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

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、主に高速道路等の整備された環境において、路面の白線等を検出することにより、走行領域を検出したり [11],[13]、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する方法 [12] や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 [4] などが提案されている。

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。例えば、画像中での視差から道路面と障害物を分離する方法が提案されている [2],[1],[8]。また走行可能な領域は空間中ではほぼ平面であるとみなせることから、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 [10],[6],[9],[5]。

図1は本論文における提案手法の全体図を示している。まず [9],[5] の手法を利用して、道路平面を抽出する処理を行う。そのためにまず、①で道路平面に対する射影変換行列を算出する。ここで、この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にて道路平面領域を抽出する(2節)。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

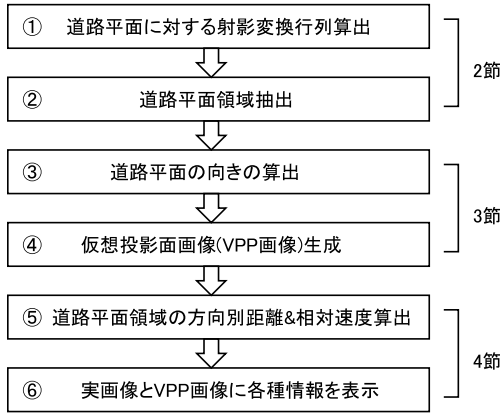


図 1: 本論文の手法の処理全体図

道路平面の向きを算出し、④にて VPP 画像を生成する (3 節). さらに、障害物を検出するために、⑤にて平面領域を 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 画像に同時に表示する (4 節). 最後に 5 節において、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.

2 道路平面抽出

2.1 処理の概要

本節では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 [9],[5] 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、基本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投影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. またテクスチャの無い領域では、平面上にない点であっても、投影後、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、 $I_i(\tilde{\mathbf{m}})$ を画像 i の $\tilde{\mathbf{m}}$ での輝度値、 \mathbf{H}

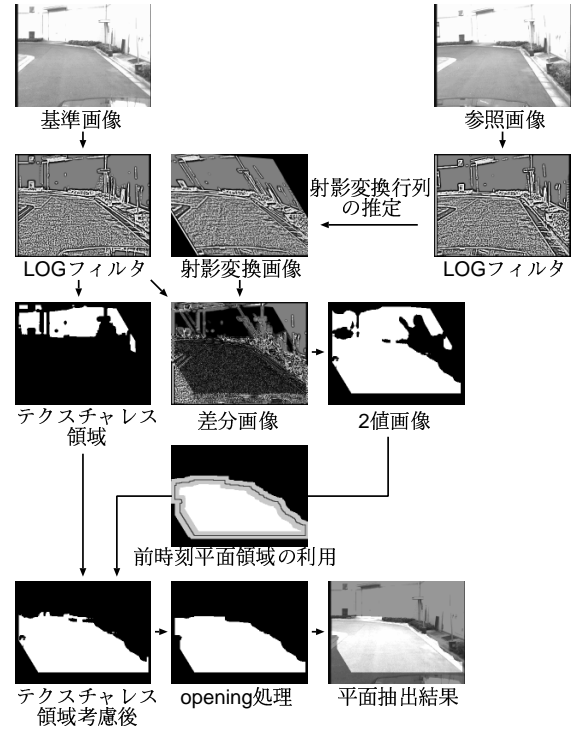


図 2: 平面抽出の処理全体図

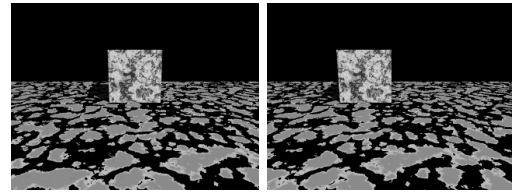


図 3: シミュレーション画像

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、

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

平面領域推定範囲内の基本画像 I_b と参照画像 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のパラメタを最急降下法を用いて求めるという手法を取っている [7].

2.2.1 射影変換行列初期値のロバスト性

上に述べた手法では、繰り返し計算のための適当な初期値を必要とする. そこで初期値に対する平面抽出結果を調べることでロバスト性を確かめるシミュレー

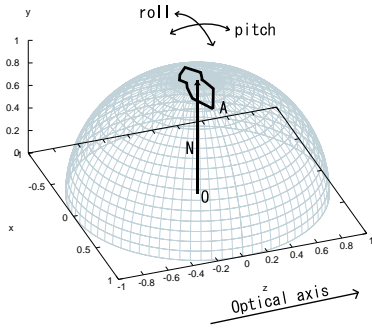


図 4: 平面抽出における法線ベクトルのロバスト性

シオン実験 (用いた画像は、図 3 であり後述する車載カメラと同様な平行ステレオ配置である) を行った。初期値は、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} をカメラの光軸に対してピッチ、ロール方向に傾け、その法線ベクトル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 4 であり、原点 O から垂直に伸びるベクトル N を真の平面の法線ベクトルとすると、領域 A に平面の法線ベクトルが収まるとき、平面を正しく抽出できたことを示している。平面の法線ベクトルがカメラの光軸方向に対してピッチ方向は 2° から -5° 、ロール方向に対しては 20° から -16° となり、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。

2.2.2 射影変換行列推定の安定化

車載カメラから道路平面抽出を撮影する場合、道路平面の傾きはカメラに対してある程度の拘束を設けることができる。また 2.2.1 節で述べた、射影変換行列の初期値のロバスト性を考慮し、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作成し、それを初期値として平面抽出を行い、得られた射影変換行列から適切なものを選ぶという方法をとる。まず始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構わないため、カメラを配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 をピッチ方向前(後)に 4° 傾けた法線ベクトル $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ と先ほど求めた $\mathbf{R}, \mathbf{t}, d$ を使って射影変換行

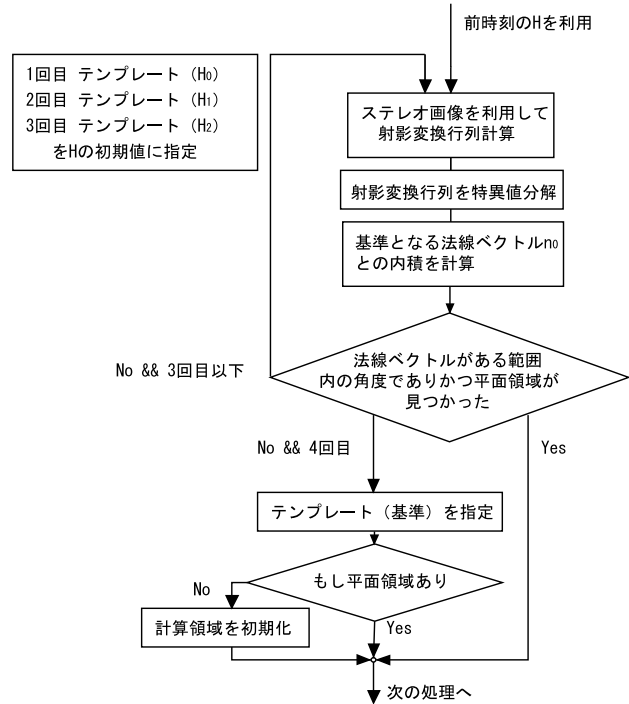


図 5: 射影変換行列安定化処理の流れ

列 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ を再構成する。ここで、基準となる射影変換行列 \mathbf{H}_0 とピッチ方向前後に動かしてできた射影変換行列 $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ の 3 つを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 5 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 \mathbf{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 [9],[5]。次に求めた射影変換行列を特異値分解して、道路平面の法線ベクトルを求め、射影変換行列 \mathbf{H}_0 から求めた法線ベクトル \mathbf{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時は、その射影変換行列は正しい平面を発見できたと見なす。それ以外の場合は、異な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。ここで射影変換行列の誤りを検出し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付からない場合は、その画像中に平面は存在していないと見なし、基準となる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

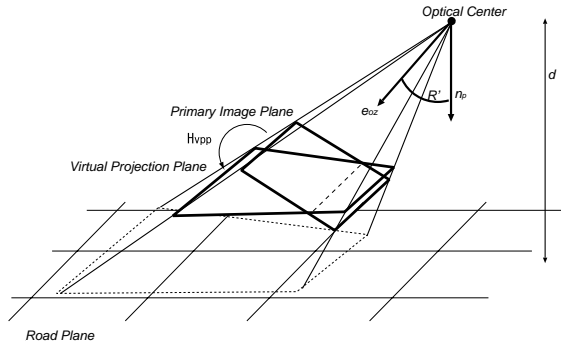


図 6: VPP 画像の幾何学的関係

ない時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。

以上の手法を使うことにより、スタート時の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、回復機能を付けることで全体が壁などで道路平面が映らなくなってしまっても、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 VPP 画像

この節では、ステレオ画像間の平面に対する射影変換行列から平面の向きを算出し、それを利用して図 6 のように基本画像を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 (VPP: Virtual Projection Plane) 画像と呼ぶことにする。

3.1 射影変換行列の特異値分解

本節では文献 [3] に述べられている方法を元に、射影変換行列から平面の姿勢を表すパラメ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。

まず、射影変換行列は以下のような関係がある。

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

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タ、定数項

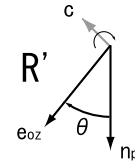


図 7: $\mathbf{n}_p, \mathbf{e}_{oz}$ と θ の関係

$k \neq 0$ 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タ $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ が既知であると、文献 [3] 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。

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

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

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

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

$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ のとき ($\epsilon_{1,3} = \pm 1$),

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

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

d を求めるには、得られた $\frac{\mathbf{t}}{d}$ 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 $|\mathbf{t}|$ を与えることで求まる。

3.2 VPP 画像の生成

次に得られた平面の法線ベクトルと平面までの距離を元に、道路平面を上方から観察し、かつカメラの方向が画像の縦軸に一致するような画像を生成する方法を述べる。

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}_p とする. 基準カメラの光軸 \mathbf{e}_{0z} と \mathbf{n}_p との外積を回転軸として \mathbf{e}_{0z} と \mathbf{n}_p のなす角を θ 回転させる変換行列を \mathbf{R}' とすると (図 7), 式 8 のように表せる.

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

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

$$\mathbf{c} = \mathbf{n}_p \times \mathbf{e}_{0z} = (c_1, c_2, c_3)^T$$

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{n}_p \cdot \mathbf{e}_{0z}}{\|\mathbf{n}_p\| \|\mathbf{e}_{0z}\|} \quad (8)$$

基準カメラをこの \mathbf{R}' により回転させた VPP 画像へ変換する射影変換行列は基準カメラの内部パラメタ行列を \mathbf{A}_{pri} , 仮想カメラの内部パラメタ行列を \mathbf{A}_{vpp} とすると,

$$\mathbf{H}' = \mathbf{A}_{\text{vpp}} \mathbf{R}' \mathbf{A}_{\text{pri}}^{-1} \quad (9)$$

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.

つぎに図 8 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 $\mathbf{e}_{0z} = (0, 0, 1)^T$ を VPP カメラ座標系から見たベクトル \mathbf{u} を考え, それを VPP 画像座標系に正射影したベクトル \mathbf{v} を考える.

まず,

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}' \mathbf{e}_{0z} \quad (10)$$

である.

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

この \mathbf{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 $\tilde{\mathbf{v}} = (v_x, v_y, 0)^T$ に変換される.

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

と $\tilde{\mathbf{v}}$ を定義し, これをカメラ方向と呼ぶ. 求める回転行列 \mathbf{R} はカメラ方向 $\tilde{\mathbf{v}}$ 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,

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

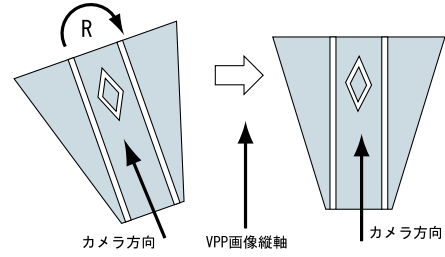
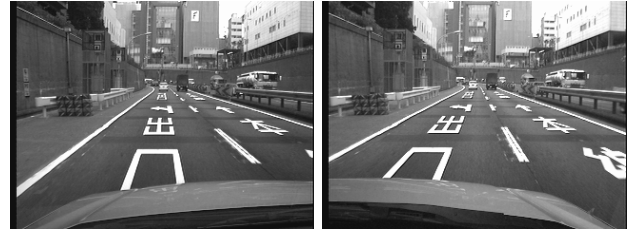


図 8: VPP 画像の回転



参照画像

基準画像

図 9: 入力画像

を満たす \mathbf{R} を求める. 先ほどの \mathbf{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 \mathbf{H}_{vpp} は,

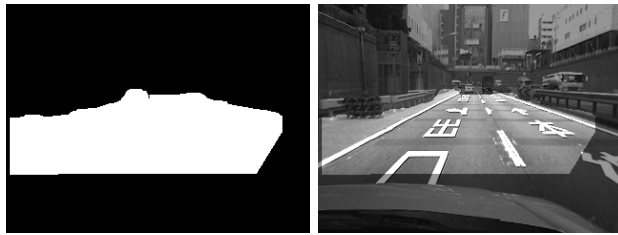
$$\mathbf{H}_{\text{vpp}} = \mathbf{R} \mathbf{H}' \quad (13)$$

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平面領域の抽出が出来る, 道路平面に対する射影変換が求まり, 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 9 を入力画像とするとき, その平面抽出結果を図 10 に, これらの画像から生成される VPP 画像を図 11 に示す.

平面抽出を利用して障害物を検出するために, まず, 道路平面を抽出することにより, 画像中での平面領域と障害物を含む非平面領域に分離される. そこで, 平面領域の変化を観測することで, 非平面領域に含まれる障害物を観測することと同等となり, それによって障害物の検出を行う. そのために, まず抽出した道路平面領域を VPP 画像に変換することで, 道路平面領域を実座標での道路平面領域に変換する. VPP 画像上での道路平面領域とその時系列データを利用することで, 空間中での障害物の位置と相対速度を算出し, 障害物検出を行う.



平面領域抽出結果

平面領域を原画像に重ね
合わせ

図 10: 平面抽出結果

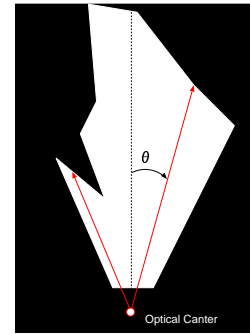
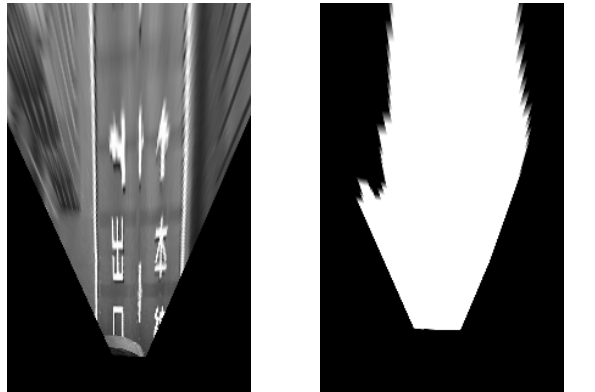


図 12: 平面の方向別距離計測



原画像の VPP 画像

平面領域の VPP 画像

図 11: VPP 画像

4.1 平面領域の方向別距離&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も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 12 のように平面領域を VPP 画像に変換した画像を用意し、その画像上で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。画像上での光学中心から平面領域の端の座標を求めることにより光軸より θ 傾いた場所における画像上での平面の拡がり長さを求めることができる。画像上での長さは仮想カメラの内部パラメ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。

次に平面領域の方向別相対速度を求める。まず、画像は 1 フレーム 1/30[sec] の間隔で撮影される。そこで、1/30[sec] 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、それを時速に換算することで方向別相対速度を得る。

4.2 実画像と VPP 画像に情報表示

図 13 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。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、暖色系の色の点で表示し、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と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。また左側の下にあるグラデーション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ものである。

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端点を表し、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、カメラを搭載した車の幅を赤いラインで示している。

5 実験結果

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

また、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&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。

まず図 14 は高速道路においての実験結果であり、自車は 100km/h 程度の速度で走行している。車の左側に静止してい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

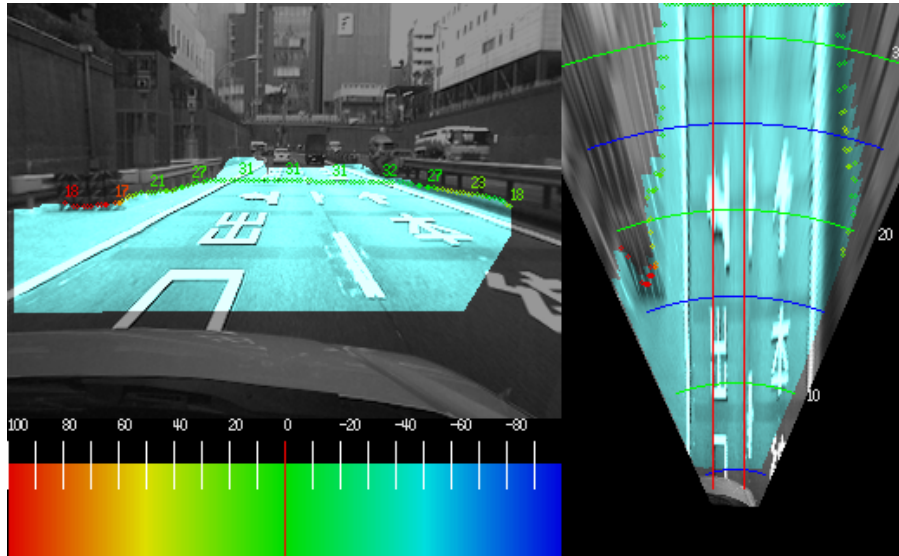


図 13: 結果表示例

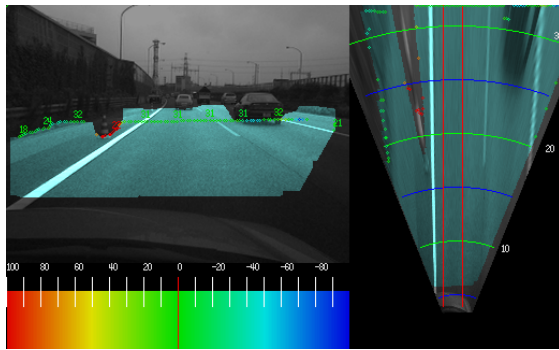


図 14: 高速道路における障害物検出結果

面は縮まるので暖色系の色で表示されている。次に図 15 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 50km/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 16 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。

また処理速度であるが、Intel Pentium4(3GHz)x1 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 $320 \times 240\text{pixel}$ 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、ステレオ動画像を用いて、画像中から空間中での平面部を検出し、その過程で計算される左右画像の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、平面の拡がりや計算することで障害物検出をする手法を提案した。

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。

参考文献

- [1] Raphael Labayrade and Didier Aubert. In-vehicle obstacle detection and characterization by stereovision.

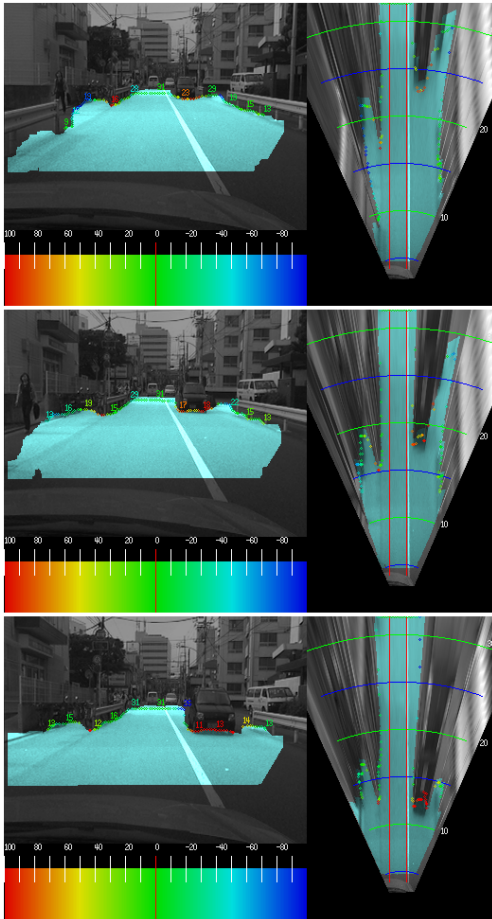


図 15: 市街地における障害物検出連続結果 1 (上から 9 フレーム (3/10 秒) おきに表示)

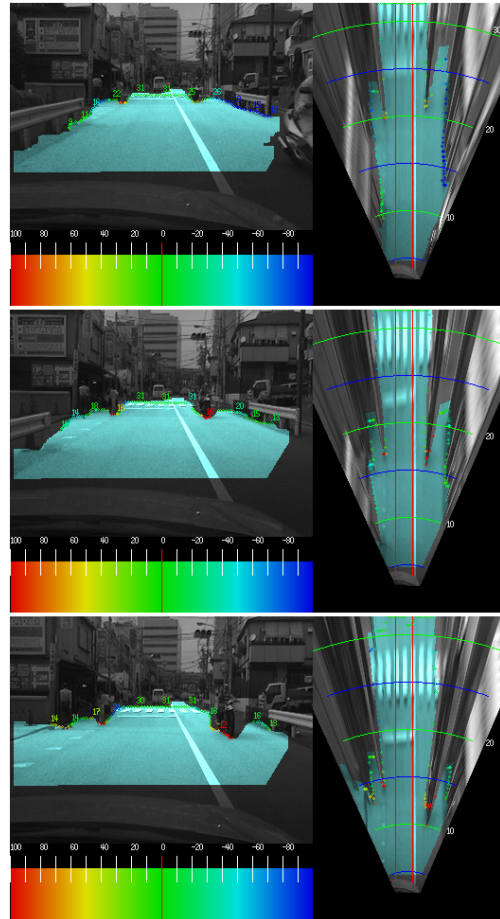


図 16: 市街地における障害物検出連続結果 2 (上から 9 フレーム (3/10 秒) おきに表示)

In Proc. In Vehicle Cognitive Computer Vision Systems, pp. 13–19, 2003.

- [2] Raphael Labayrade, Didier Aubert, and Jean-Philippe Rarel. Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through “v-disparity” representation. In Proc. IV, 2002.
- [3] O.D.Faugeras and F.Lustman. Motion and structure from motion in a piecewise planar environment. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol. 2, No. 3, pp. 485–508, 1988.
- [4] Ryuzo Okada, Yasuhiro Taniguchi, Kenji Furukawa, and Kazunori Onoguchi. Obscure detection using projective invariant and vanishing lines. In Proc. ICCV, pp. 330–337, 2003.
- [5] Okutomi, Nakano, Maruyama, and Hara. Robust estimation of planar regions for visual navigation using sequential stereo images. In Proc. ICRA, pp. 3321–3327, 2002.
- [6] Okutomi and Noguchi. Extraction of road region using stereo images. In Proc. ICPR, pp. 853–856, 1998.
- [7] Heung-Yeung Shum and Richard Szeliski. Panoramic image mosaics. *Microsoft Research*, No. MSR-TR-97-23, 1997.

- [8] Qian Yu, Helder Araujo, and Hong Wang. Stereo-vision based real time obstacle detection for urban environments. In Proc. International Conference on Advanced Robotics, pp. 1671–1676, 2003.

- [9] 奥富正敏, 中野勝之, 丸山純一, 原智章. ステレオ動画を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.
- [10] 奥富正敏, 野口卓, 中野勝之. ステレオ画像からの射影変換行列の抽出による道路領域検出. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 8, pp. 1105–1111, 2000.
- [11] 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.
- [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] 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.