

## 対応探索とカメラキャリブレーションが不要なステレオ法

服部 寛

(株) 東芝 研究開発センター

### 概要

2次元平面上の視覚誘導を目的とする、対応探索とカメラキャリブレーションが不要なステレオ法について述べる。弱校正された (weakly calibrated) ステレオで障害物を直接的に検出する方式が提案されているが、カメラの振動や平面の傾斜変化への有効な対処法や、検出した障害物の危険さの評価する尺度が欠如している。これらの問題を解決するため、道路の持つ性質を積極的に利用したステレオ法を提案する。すなわち、奥行き方向に細長いこと、走行車線を示す平行線が存在することを利用し、ステレオ画像のエピポーラ拘束の線形化、カメラの振動と傾斜変化への対処、さらに障害物の衝突時間の計算の簡略化を行なう。実画像を用いて行なった実験を通して、提案法が様々な画像に対して適用可能であることを示す。

## Stereo without Depth Search and Metric Calibration

Hiroshi Hattori

Toshiba Corporate Research & Development Center

### Abstract

We propose a new stereo method for 2D navigation without depth search and metric camera calibration. Although there is such a stereo method assuming that an observer moves on flat planes, the conventional method has the following drawbacks. First, it lacks of an effective contrivance to deal with camera vibrations and inclination. Second, there is no measure to assess the danger of detected obstacles. To solve these problems, we develop a domain-specific stereo method which utilizes various attributes of roads. We introduce the *pseudo-projective camera model* in order to simplify the epipolar geometry. Also, extraction of two parallel lines marking the driving lane enables us to correctly detect obstacles and even to estimate the degree of the danger. Through experiments we demonstrate that our method is efficient applicable to a variety of outdoor scenes.

## 1 はじめに

障害物検出はロボットの視覚誘導、自動車の安全運転支援や自律走行に不可欠なコンピュータビジョンの中心的課題である。2次元の画像から3次元空間に存在する障害物を検出するためにはステレオ視が有効である。ステレオ視とは異なる視点から複数の画像を取得し、同一の各画像上の投影位置の違い(視差)から3次元情報を復元する技術である。ステレオ視は古くから盛んに研究され、数多くの方式が提案されているが[17, 18], 従来法のほとんどは対応探索とカメラキャリブレーションという2つの問題を抱えている。対応探索とはステレオ画像間で対応点を見つけるための探索処理であり、計算コストが高い。カメラキャリブレーションとは3次元形状が既知なターゲットを用いて各カメラの位置・姿勢、内部パラメータを求める作業であり、多大な時間と労力を必要とする。本報告では、これらの2つの問題を回避したステレオ法について述べる。

車や多くのロボットは道路や床面といった平面上を走行する。動きが2次元平面上に限定されることを利用し、平面上の障害物を検出する方式が提案されている[2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 15]。以下ではこの方式を平面障害物検出法(ground plane obstacle detection method)と呼ぶ。平面障害物検出法は次のように要約できる。ステレオ画像のいずれか一方の画像を基準画像とし、もう一方の画像を、画像上の点が全て平面上に存在する(平面に対する高さが0)と仮定して基準画像の視点から見た画像に変換する。変換後の画像と基準画像を比較すると、平面上にない点には高さに応じた視差が生じるのに対し、平面上の点の視差は0となる。この性質を利用し、基準画像と変換画像の間の差分を取り、平面に対して高さのある領域、すなわち障害物領域を検出する。

平面障害物検出法ではステレオ視における第1の問題である対応探索が不要である。この利点を生かし、キャリブレーションされたステレオを用いた平面障害物検出の研究が行なわれている[2, 3, 5, 11]。さらに、障害物の画像上の位置を求めるのであればキャリブレーションも不要とすることができる。このアプローチでは、平面上の対応点の間に成り立つ拘束式(通常、 $3 \times 3$ の平面射影変換行列 $H$ で表現される)を画像から直接算出し、この拘束式を用いて障害物領域を検出する。本報告では平面上の対応点間に成り立つ拘束をGP(Ground Plane)拘束と呼ぶ。GP拘束は2つのカメラと平面の幾何学的関係によって決まるため、走行中にカメラの振動や平面の傾斜に変化が生じた場合には再計算の必要がある。この際、平面上の特徴のステレオ画像間の対応関係からGP拘束を更新する。ステレオカメラのエピポーラ拘束を事前に求めておけば、平面上の特徴の対応関係を効率的に求めることが可能となる。エピポーラ拘束のみ事前に求める

ことを一般に弱キャリブレーション、弱キャリブレーションを前提とするステレオをweakly calibrated stereoと呼ぶ。弱キャリブレーションでは画像上の対応点だけを使うため、外部ターゲットを用いる通常のキャリブレーションに比べて必要となる手間が格段に軽減される。

しかしながら、従来の弱キャリブレーションを前提とした平面障害物検出法[6, 8, 9]には以下に示す問題点がある。第1に従来法ではエピポーラ拘束を $3 \times 3$ の基礎行列 $F$ [10, 12]で表現するが、基礎行列 $F$ の算出は一般的に困難である。第2に特に屋外環境で顕著となるカメラの振動や平面の傾斜変化への有効な対処法が欠如している。第3に弱キャリブレーションを前提とする場合、障害物までの距離といった情報は復元されないにも関わらず、検出した障害物の危険性を評価する尺度がない。

これらの問題を解決するため、適用シーンを道路に限定し、道路環境の性質を利用した方式を提案する。奥行き方向に細長い空間において有効な擬似射影カメラモデルという新しいカメラモデルを導入し、2つの擬似射影カメラには線形なエピポーラ幾何が定義できることを示す。この線形化によりエピポーラ拘束の算出が容易となる。また、走行車線を示す2本の白線を抽出し、GP拘束の更新、誤検出の除去、さらに衝突時間を基準として、検出した障害物の危険度の評価を行なう。提案法はPentium II 450MHz プロセッサ搭載のPC上で $320 \times 240$ 画素のステレオ画像に対し、MMX命令を使用せずに15Hzの処理が可能である。実画像を用いて行なった実験を通じて本手法が有効であり、様々な画像に対して適用可能であることを示す。

## 2 エピポーラ拘束の算出

### 2.1 擬似射影カメラモデル

本節では道路シーンの幾何学的な性質を利用し、擬似射影カメラモデルという新しい投影モデルを提案する。ここで利用する性質とは、道路は奥行き方向に細長いという性質である。つまり、対象となる空間は水平方向の広がりか奥行き方向の広がりによって狭いと仮定することができる。また、傾斜の変化や自車の振動に応じてカメラから見て変化する道路面に対するエピポーラ拘束を求めればよいので、垂直方向の広がりも限定することができる。奥行き方向に細長い空間で有効なカメラモデルを考える。

画像上の点 $(u, v)$ と3次元空間中の点 $(X, Y, Z)$ の間には、一般に以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} wu \\ wv \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

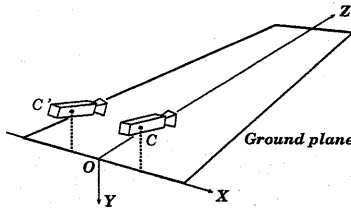


図 1: 座標系の定義.

$w$  はスケール因子,  $P_{ji}(i=1\sim 4, j=1\sim 3)$  はカメラの位置, 姿勢, 焦点距離, 画像中心等に依存するパラメータである. 式 (1) は射影カメラモデルと呼ばれる最も一般的なカメラモデルを表す [1]. ここで, 図 1 のように道路面を  $XZ$  平面 ( $Y=0$ ), 2つのカメラの中心  $C, C'$  を通る直線の道路面への射影を  $X$  軸とする座標系を定義する. この座標系ではカメラ中心の座標は  $(X_0, Y_0, 0)$  と表せるので,

$$w = P_{31}(X - X_0) + P_{32}(Y - Y_0) + P_{33}Z \quad (2)$$

となる.  $\mathbf{k}=(P_{31}, P_{32}, P_{33})$  はカメラの光軸方向を表す.

$\mathbf{k}$  が他の座標軸に比べて  $Z$  軸方向に近く ( $P_{31} < P_{33}$ ,  $P_{32} < P_{33}$ ), 対象空間の水平 ( $X$ ), 垂直方向 ( $Y$ ) の広がり方が奥行き ( $Z$ ) に比べて小さい場合 ( $X - X_0 \ll Z$ ,  $Y - Y_0 \ll Z$ ),

$$w \simeq P_{33}Z \quad (3)$$

なる近似式が成り立つ.  $P_{ji}(i=1\sim 4, j=1\sim 3)$  は定数倍しても同一のカメラモデルを表すため  $P_{33}=1$  としても一般性を失わない. 式 (1) に  $w=Z$  を代入し, 擬似射影カメラモデルを次式により定義する,

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{Z} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

擬似射影カメラモデルは  $w$  を  $Z$  のみの関数とする,  $(X, Y)$  に関して線形な投影モデルである. これに伴い, 図 2 に示すように水平, 垂直方向の平行性は投影の前後で保存され (3次元空間において平行な線は画像上でも平行となる), 奥行き方向の平行性だけが保存されない (3次元空間において平行な線が画像上で交点を持つ). 式 (2) に示すように  $w$  を  $(X, Y, Z)$  の関数とする射影カメラでは 3方向の平行性が全て保存されず,  $w$  を定数とみなすアフィンカメラ [4, 19] ではあらゆる方向の平行性が保存される. この点で擬似射影カメラは, 射影カメラとアフィンカメラの中間的な性質を持つと言える. 擬似射影カメラモデルは奥行き方向に細長い空間では精度の高いカメラの投影モデルである. 次節において, 正射影カメラ [16]

やアフィンカメラと同様に, 2つの擬似射影カメラに対して線形なエピポーラ拘束が定義できることを示す.

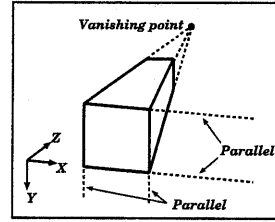


図 2: 擬似射影カメラモデル下の投影像.

## 2.2 擬似射影カメラのエピポーラ拘束

式 (4) は次のように表現できる.

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}\mathbf{X} + \frac{Y}{Z}\mathbf{b} + \mathbf{c} \quad (5)$$

ここで,  $\mathbf{u}=(u, v)^T$ ,  $\mathbf{X}=(X/Z, 1/Z)^T$ ,  $\mathbf{b}=(P_{12}, P_{22})^T$ ,  $\mathbf{c}=(P_{13}, P_{23})^T$  であり,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{14} \\ P_{21} & P_{24} \end{bmatrix} \quad (6)$$

である. 同様に他方のカメラに対して以下の式を得る.

$$\mathbf{u}' = \mathbf{M}'\mathbf{X} + \frac{Y}{Z}\mathbf{b}' + \mathbf{c}' \quad (7)$$

ここで  $\mathbf{u}'$  等の '(プライム)' は, そのパラメータが第 2 のカメラに関するものであることを示す. 式 (5), (7) より  $\mathbf{X}$  を消去すると,

$$\mathbf{u}' = \mathbf{A}\mathbf{u} + \frac{Y}{Z}\mathbf{d} + \mathbf{t} \quad (8)$$

を得る. ただし,  $\mathbf{A} = \mathbf{M}'\mathbf{M}^{-1}$ ,  $\mathbf{d} = \mathbf{b}' - \mathbf{A}\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{t} = \mathbf{c}' - \mathbf{A}\mathbf{c}$  である. したがって,

$$(\mathbf{u}' - \mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{t}) \cdot \mathbf{d}^\perp = 0 \quad (9)$$

となる. ただし,  $\mathbf{d}^\perp$  は  $\mathbf{d}$  に直交する  $2 \times 1$  ベクトルである. 式 (9) は以下のように書き直せる.

$$f_1 u' + f_2 v' + f_3 u + f_4 v + f_5 = 0 \quad (10)$$

ここで  $(f_1, f_2)^T = \mathbf{d}^\perp$ ,  $(f_3, f_4)^T = -\mathbf{A}^T \mathbf{d}^\perp$ ,  $f_5 = -\mathbf{t}^T \mathbf{d}^\perp$  である. 式 (10) は対応点  $\mathbf{u}, \mathbf{u}'$  に対する拘束, つまりエピポーラ拘束を表す. 式 (10) のような  $\mathbf{u}, \mathbf{u}'$  に関して線形なエピポーラ拘束をアフィンエピポーラ拘束と呼ぶ [4]. 係数  $f_i (i=1 \sim 5)$  は複数の対応点から求める. 一般のエピポーラ拘束は前述のように  $3 \times 3$  の基礎行列  $\mathbf{F}$  を用いて表現され, この場合  $\mathbf{u}, \mathbf{u}'$  に関して線形とならないが, 式 (10) は  $\mathbf{u}, \mathbf{u}'$  に関して線形であり係数  $f_i (i=1 \sim 5)$  の算出が容易である.

図 3 にアフィンエピポーラ拘束の例を示す. この例では手動で求めた 29 組の対応点を用いて係数  $f_i (i=1 \sim 5)$  を求めた. 左画像上の直線  $l_A, l_B, l_C, l_D$  が各々, 右画像

上の点  $A, B, C, D$  に対するエビポーラインである。擬似射影カメラではアフィンカメラと同様に全てのエビポーラインが互いに平行となる。点  $A, D$  までの距離は各々約  $24m, 6m$  であり、奥行きの変化にも関わらずエビポーラインが互いに平行であり、かつ各対応点がほぼエビポーライン上にあることがわかる。この例では対応点とエビポーライン間の距離は平均  $0.5$  画素である。提案法では係数  $f_i (i=1 \sim 5)$  のみ事前に求める。その他のカメラパラメータは一切不要である。

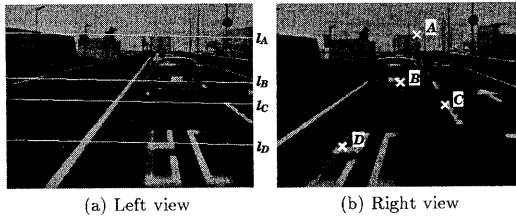


図 3: アフィンエビポーラ拘束。

### 3 平面拘束を用いた障害物領域の検出

#### 3.1 アフィン GP 拘束

$u$  と  $u'$  を道路面  $Y=0$  上のステレオ画像間の対応点とすると、式 (8) に  $Y=0$  を代入して、

$$u' = Au + t \quad (11)$$

という関係式を得る。 $A$  は  $2 \times 2$  の行列、 $t$  は  $2 \times 1$  のベクトルである。式 (11) は擬似射影カメラモデルの下で道路平面上の対応点間に成り立つ拘束、つまり GP 拘束を表す。一般には GP 拘束は射影変換で表現されるが、擬似射影カメラでは 2 次元のアフィン変換で表される。アフィン変換で表した GP 拘束を特にアフィン GP 拘束と呼ぶ。平面障害物検出ではステレオ画像の内のどちらか一方の画像を GP 拘束を用いて変換することが必要となるため、GP 拘束の簡略化、つまり射影変換をアフィン変換で近似することは計算コスト削減の点で重要である。

GP 拘束は自車の振動や道路の傾斜変化に応じて更新する必要がある。weakly calibrated stereo では最低 2 本の線の対応関係から GP 拘束を求めることができる。提案法では自車線を示す 2 本の白線を左右の各画像上で抽出し、その抽出結果からアフィン GP 拘束を求める。

図 4 に障害物検出の処理過程を示す。図 4(a), (b) は入力ステレオ画像であり、各画像上で (c), (d) のように 2 本の白線を抽出する。この 2 本の白線の抽出結果とエビポーラ拘束からアフィン GP 拘束を計算する。求めたアフィン GP 拘束を用いて左画像 (a) を (e) に示すような画像に変換する。(e) に示す画像は、左画像上の点がすべて道路面上の点 (道路面に描かれている) と仮定したとき、右画像として得られるべき画像である。右画像 (b) と変換画

像 (e) を比較すると、道路面上にない点にのみ視差が生じるため、画像 (b) と (e) の差分を取り、(f) に示すように道路面から高さを有する障害物領域 (白領域) を検出する。

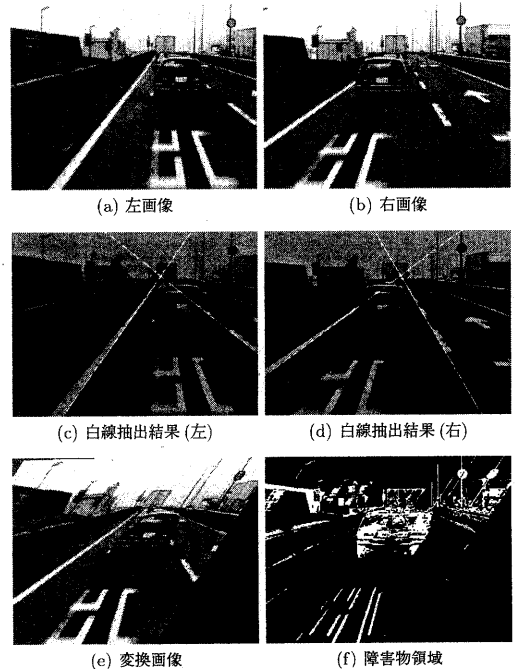


図 4: 障害物検出の処理過程。

#### 3.2 ノイズ除去

原理的には白線を使って GP 拘束を求めれば、自車の振動や道路の傾斜変化に関わらず障害物検出可能である。しかし、実際には白線は図 4 のように破線であったり、障害物に隠されることがあるため、求めた GP 拘束には誤差が含まれる。この影響で図 4(f) のように道路上の模様の一部が障害物として誤って検出されることになる。より多くの道路の特徴を抽出してステレオ対応づけを行えば GP 拘束の精度を上げることは可能であるが [6, 8], 対応探索が不要という平面障害物検出法のメリットを失うことになる。

本節では実用的かつ効果的なノイズ除去方式を示す。本方式では検出した領域が真の障害物か否かを高さの情報を用いて判別する。weakly calibrated stereo では絶対的な高さは復元できないが、空間中で互いに平行な 2 本の白線の画像上の交点、すなわち消失点を用いると、障害物の相対的な高さを計算できる。図 5 にアイデアの概要を示す。同図 (a) に示すような点  $u_b$  と  $u_t$  間に灰色の矩形領域が障害物領域の候補として検出されたとする。カメラのロール角が小さいと仮定すると道路面に対する

画像上の消失線は、消失点  $u_{\infty}$  を通る走査線にほぼ一致する。道路の横方向の傾斜が微小であり、さらに、カメラの振動はほとんど縦揺れであるため、走行中もこの仮定は妥当である。図 5(a) に示すように対象領域の画像上の垂直方向の長さを  $dv$ 、対象領域の下端点  $u_b$  と消失線の垂直距離を  $V$  とする。また、図 5(b) に示すように、カメラと対象領域の 3 次元空間における道路面からの高さを各々  $H$ 、 $h$  とする。擬似射影カメラモデルは第 2.1 節で述べたように高さ方向 ( $Y$ ) に関して線形な投影モデルだから、高さの比は投影の前後で不変である。したがって、 $H$  に対する障害物の相対的な高さ  $\eta$  は、

$$\eta = h/H = dv/V \quad (12)$$

として求めることができる。この式により、各障害物領域の相対的な高さを評価する。各障害物領域候補に対して計算した相対的な高さ  $\eta$  が、あらかじめ設定した閾値よりも小さい場合には、その障害物領域はノイズとして障害物領域から除外する。

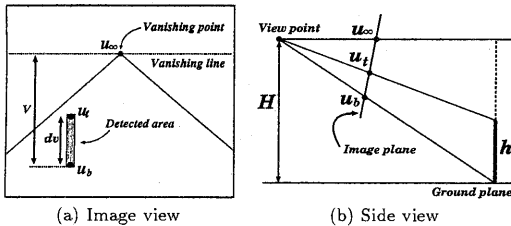


図 5: 相対的な高さを用いたノイズ除去方式。

#### 4 衝突時間の計算

検出した障害物の危険性の評価尺度としては障害物までの(ユークリッド)距離が使われることが多い。しかし、距離だけでは障害物の危険性を適切に評価することができない。例えば、自転車から同じ距離だけ離れた位置に存在する 2 つの障害物の危険性は、一方が自転車に向かって動いていて、他方が離れていく場合には明らかに異なる。障害物の危険性を適切に評価するためにはカメラと障害物の相対的な動きを考慮しなければならない。

障害物がカメラ位置に到達するまでの時間、すなわち、衝突時間 (time to contact) によれば、カメラと障害物の相対運動を考慮し、障害物の危険度を正しく評価できる。衝突時間は、対象物とカメラが現在の相対運動を維

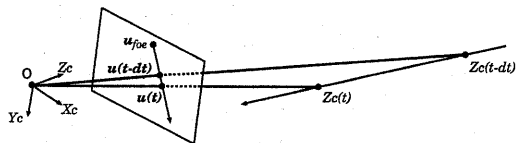


図 6: Time to contact

持した場合に両者の位置が一致するまでの時間と定義される。  $Z_c$  を奥行き方向としたカメラ座標系に対する物体の座標を  $(X_c, Y_c, Z_c)$  とすると、衝突時間  $t_c$  は以下のように表される。

$$t_c = \frac{Z_c(t)}{Z_c(t-dt) - Z_c(t)} dt \quad (13)$$

ここで  $Z_c(t-dt)$  と  $Z_c(t)$  は各々、図 6 に示す時刻  $t-dt$ 、 $t$  における対象物の奥行きである。複比が射影変換に対して不変であることから式 (13) は

$$t_c = \frac{|u(t-dt) - u_{foe}|}{|u(t) - u(t-dt)|} dt \quad (14)$$

と表現できる。ここで  $u(t-dt)$  と  $u(t)$  は各々、時刻  $t-dt$ 、 $t$  における対象物の画像上の位置、  $u_{foe}$  は動きの無限遠点 (focus of expansion, FOE) である。式 (14) は衝突時間の重要な性質を示唆している。すなわち、衝突時間  $t_c$  は物体の画像上の動きと FOE から計算可能であり、物体までの距離等の情報は不要である。

このような性質を利用して衝突時間を求める様々な方式が提案されている [7, 13, 14]。しかしながら、これらの方式では密なフロー計算が前提となっていたり、物体の輪郭を画像から抽出・追跡する必要がある。これに対し、平面障害物検出法は衝突時間を求める上で以下に示す利点がある。第 1 に障害物の衝突時間を求めればよいのであり、障害物領域が各時刻において検出されているため、処理領域を限定することができる。第 2 に物体の動きの計算が容易になる。図 7 に示すように先行車が自車に接近する場合を考える。平面障害物検出法によれば、各時刻において先行車 (障害物) と道路面の境界線を求めることができる。図 7 のように時刻  $t-dt$ 、 $t$  における両者の境界線を各々  $\Gamma(t-dt)$ 、 $\Gamma(t)$  とする。時刻  $t-dt$  における境界線  $\Gamma(t-dt)$  上の任意の点は、時刻  $t$  では境界線  $\Gamma(t)$  上にあるので、境界線上にある点の動き推定は 1 次元の探索問題に帰着する。特に自車と障害物が車線に沿って走行する場合には、自車の動きに対応する FOE と障害物の動きに対応する FOE が 2 本の白線の消失点  $u_{\infty}$  に一致するため、障害物の動きが一意に決まる。本報告では、この最も簡単なケースを扱う。より複雑な運動に関しては現在方式検討中である。

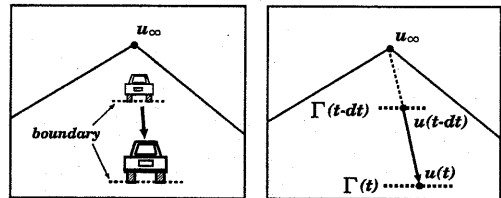


図 7: 障害物の動き推定。

## 5 実験

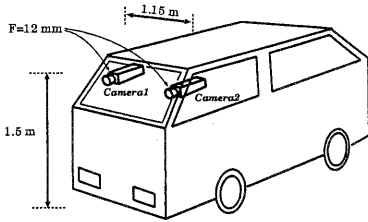


図 8: ステレオ画像収集用実験車。

提案法の有効性を確認するため、様々な状況下で撮影した画像を用いて実験を行なった。ステレオ画像は図 8 に示す実験車を用いて高速道路にて収集した。カメラ間隔は 1.15m、高さ 1.5m、レンズの焦点距離 12mm、画像の解像度 320×240 画素である。また、車速は約 100km/h である。なお、これらのパラメータは提案法では一切不要であり、また、2つのカメラは互いに平行でない。

図 9 に様々な条件下での処理結果を示す。実験では自車レーンの中の自由空間(自車走行レーン内の最も手前の障害物までの空間)を抽出し、抽出した領域を明度を上げて表示している。(f) は夜間における処理結果である。カメラの振動、道路の傾斜変化、影、模様、明るさの変化等に関らず、自由空間が正しく検出されている。

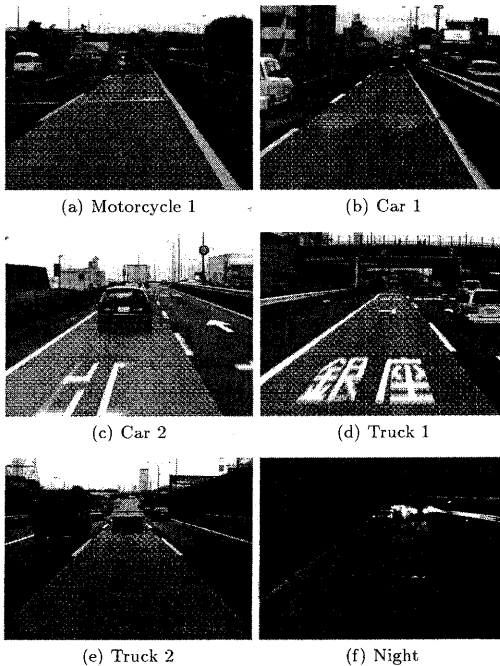


図 9: 処理結果。

図 10 に示す画像系列は、路面の凹凸によってカメラが非常に大きく振動した場合の処理結果である。この例では道路上に障害物が存在しない。道路上の文字等を誤検出することなく、無限遠方までの延びる自車レーンの自由空間を正しく抽出している。図 11 にフレーム 0~80 における 2 本の白線の消失点の垂直方向の動きを示す。特にフレーム 30 と 50 の間でカメラは大きく振動しているのがわかる。消失点の垂直位置の最大値と最小値は各々 82 画素、56 画素であり、26 画素の幅がある。図 12(a) は振動を考慮せず、あらかじめ求めておいた GP 拘束を用いて障害物を検出したフレーム 36(図 10(c))の結果である。道路面から高さがあると判定された領域を白領域で示している。道路上には障害物が存在しないにも関わらず、カメラのピッチングにより道路中央の文字が大きく誤抽出されている。一方、図 12(b) に白線を使って計算した GP 拘束を用いて処理した結果を示す。GP 拘束の更新によってカメラの振動を吸収しているため、誤抽出領域が格段に減少していることがわかる。実際、図 12(a) では道路上の 5339 個の点が誤抽出されているのに対し、(b) では、その数が 2202 個となっている。すなわち、この例では高さがあると誤判定された点が約 60% 減少している。この障害物検出結果に対し、第 3.2 節で述べたノイズ除去方式を適用し、最終的に図 10 に示すような処理結果を得る。

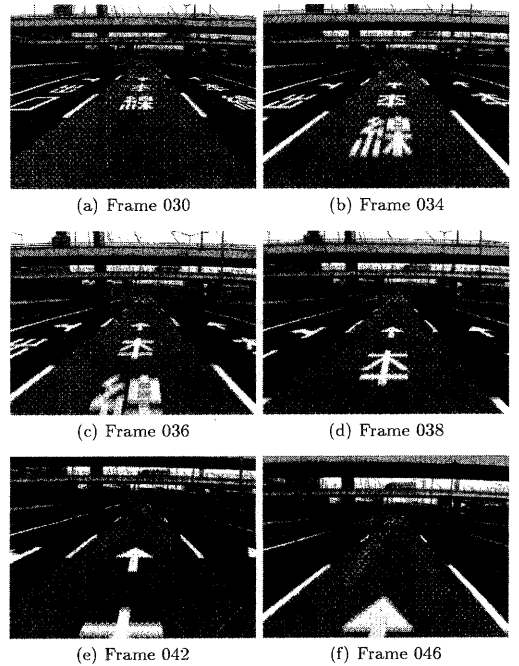


図 10: 処理結果“Vibration”。

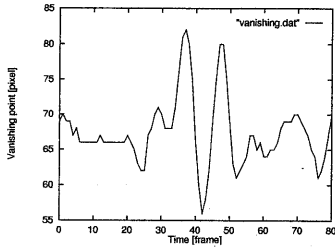
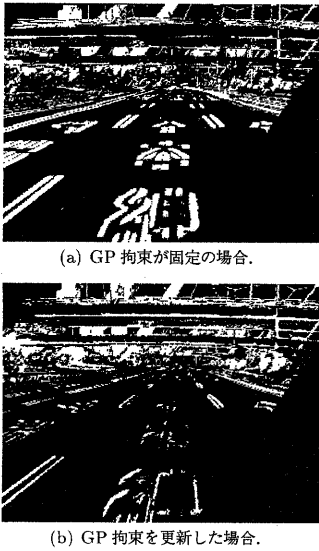


図 11: 消失点の垂直方向の動き。



(a) GP 拘束が固定の場合。

(b) GP 拘束を更新した場合。

図 12: 道路面から高さがあると判定された障害物領域。

図 13は前方のオートバイが障害物として存在する例である。前方のオートバイはフレーム 0~150 間で徐々に自転車に接近し、フレーム 150~170 間で自転車に対してほぼ静止した後、自転車から遠ざかっていく。図 14に自由空間と障害物領域の境界線(白領域の上端)の時間変化を示す。太線は提案手法による結果を示し、破線は手動により得た真値を示す。提案法によって得た結果は真値とほぼ一致しており、誤差は平均 2.9 画素である。

提案法は自由空間と障害物領域を画像上で分離するだけでなく、検出した障害物の衝突時間も算出する。衝突時間は第 4 章で述べたように、障害物と自由空間の境界線の動きと、2本の白線の消失点から計算する。図 15にフレーム 60~140 間の衝突時間の計測値の変化を示す。この間、前方のオートバイが自転車に対してほぼ等速で接近するため、理論的には衝突時間は線形に変化するが、図 15に示すように計測結果もほぼ線形に変化しており、衝突時間が適切に計算されているのがわかる。

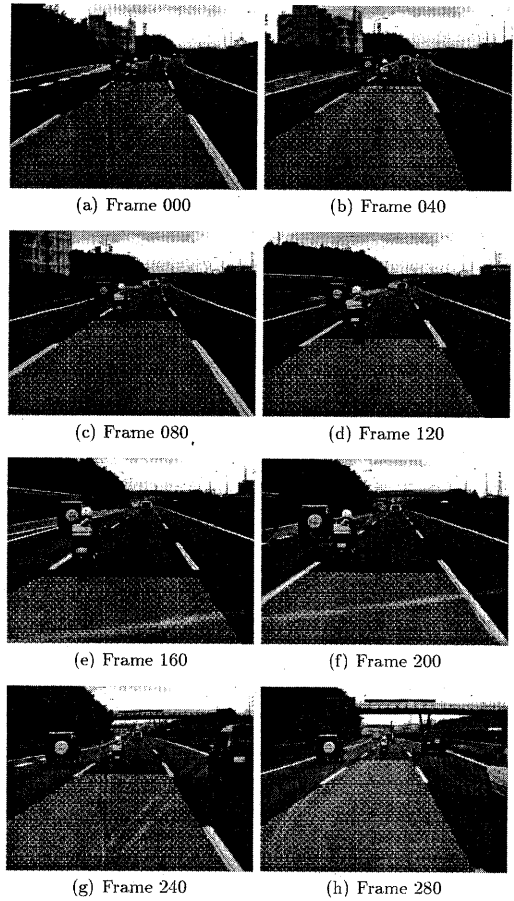


図 13: 処理結果“Motorcycle 2”。

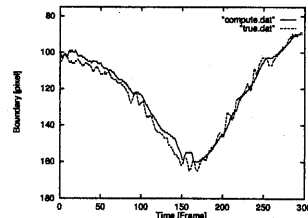


図 14: 障害物と自由空間の境界線の垂直方向の動き。

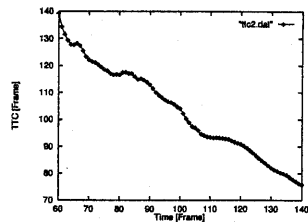


図 15: 衝突時間の時間変化。

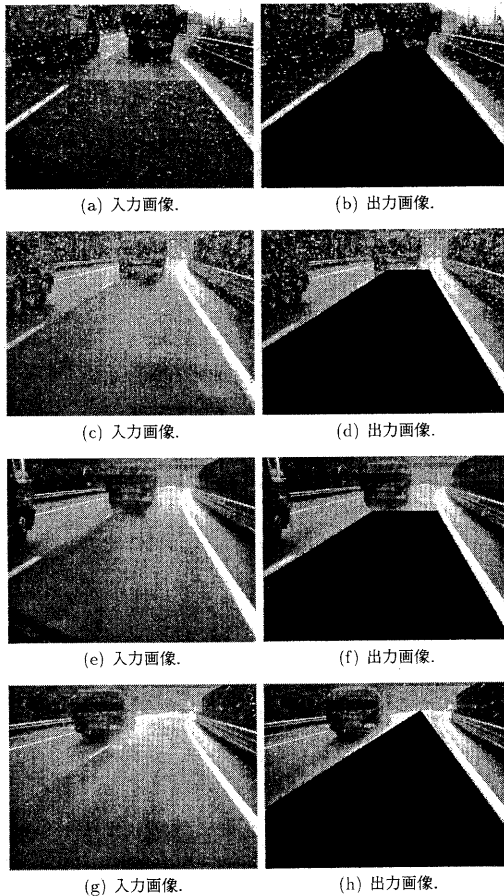


図 16: 処理結果 “Rain”。

図 16に雨天時の結果を示す。この例では結果を明確に示すため、各行左側に入力画像、右側に対応する出力画像を提示し、検出された自転車レーンの自由空間を黒いマスクで表している。激しい雨にも関わらず自由空間を正しく抽出している。このような状況下ではステレオ画像間で対応づけを精度良く行なうことは極めて困難である。この結果は、計算コストの観点だけでなく、悪天候等に対するロバスト性の点でも対応づけを行なう障害物検出法よりも提案法が優れていることを示す。

## 6 まとめ

車の安全運転の支援や自動走行を目的とし、道路の性質を積極的に利用したステレオ法を提案した。すなわち、奥行き方向に細長いこと、走行車線を示す平行線が存在することを利用して、ステレオ画像のエピポーラ幾何の

線形化、カメラの振動や道路面の傾斜変化への対処、さらに障害物の衝突時間計算の簡略化が可能であることを示した。実画像による実験を通じて、提案法の有効性を確認し、雨天や夜間を含む様々な状況に適用可能であることを示した。提案法は通常のステレオ法の本質的問題である、外部ターゲットを使うキャリブレーションとステレオ画像間の対応探索が不要であるという点で実用的である。今後は、障害物や自転車の複雑な運動を扱えるように衝突時間計算方式の改良を行なうとともに、処理の高速化および抽出精度の改善を図る。

## 参考文献

- [1] J.L.Mundy and A.Zisserman, editors. *Geometric invariance in computer vision*. The MIT Press, 1992.
- [2] K.Onoguchi, N.Takeda, and M.Watanabe. Planar projection stereopsis method for road extraction. In *Proc.IROS*, pages 249–256, 1995.
- [3] K.Storjohann, Th.Zielke, H.A.Mallot, and W.von Seelen. Visual obstacle detection for automatically guided vehicles. In *Proc. ICRA*, pages 761–766, 1990.
- [4] L.S.Shapiro. *Affine Analysis of Image Sequences*. PhD thesis, Dept. Engineering Science, University of Oxford, 1993.
- [5] M.Bertozzi and A.Broggi. GOLD: a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997.
- [6] M.I.A.Lourakis and S.C.Orphanoudakis. Visual detection of obstacles assuming a locally planar ground. In *Proc. 3rd ACCV*, volume II, pages 527–534, 1998.
- [7] M.I.A.Lourakis and S.C.Orphanoudakis. Using planar parallax to estimate the time-to-contact. In *Proc. CVPR*, volume II, pages 640–645, 1999.
- [8] M.Okutomi and S.Noguchi. Extraction of road region using stereo images. In *Proc. ICPR*, pages 853–856, 1998.
- [9] M.Xie. Ground plane obstacle detection from stereo pair of images without matching. In *Proc. 2nd ACCV*, volume II, pages 280–284, 1995.
- [10] O.D.Faugeras. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In *Proc. 2nd ECCV*, pages 563–578, 1992.
- [11] Q.-T.Luong, J.Weber, D.Koller, and J.Malik. An integrated stereo-based approach to automatic vehicle guidance. In *Proc. 5th ICCV*, pages 52–57, 1995.
- [12] Q.-T.Luong and O.D.Faugeras. The fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis. *IJCV*, 17(1):43–76, 1996.
- [13] R.Cipolla and A.Blake. Surface orientation and time to contact from image divergence and deformation. In *Proc. 2nd ECCV*, pages 187–202, 1992.
- [14] R.C.Nelson and J.Aloimonos. Using flow field divergence for obstacle avoidance: towards qualitative vision. In *Proc. 1st ICCV*, pages 188–196, 1988.
- [15] S.Carlsson and J-O.Eklundh. Object detection using model-based prediction and motion parallax. In *Proc. 1st ECCV*, pages 297–306, 1990.
- [16] T.S.Huang and C.H.Lee. Motion and structure from orthographic projections. *PAMI*, 11(5):536–541, 1989.
- [17] U.R.Dhond and J.K.Agarwal. Structure from stereo - a review. *Trans. Systems, and Man Cybernetics*, 19:1489–1510, February 1989.
- [18] 奥富. CVCV-WG 特別報告: コンピュータビジョンにおける技術評論と将来展望 (X) —ステレオ視 (stereo vision)—. 96-CVIM-102:57–64, 1996.
- [19] 佐藤, editor. コンピュータビジョン - 視覚の幾何学 -. コロナ社, 1999.