

## 自律走行車のためのステレオビジョンによる 道路面と移動物体の認識

佐藤 淳\*

富田文明\*\*

\*アイシン精機(株)

\*\*電子技術総合研究所

### あらまし

走行環境を認識することは車両に自律走行機能をもたせる上で大きな課題となる。本研究では走行環境を認識するために特に重要な道路面の3次元形状の認識手法、及び道路上の移動体の認識手法について報告する。道路面の認識では、両眼立体視により得られる3次元情報をもとに滑らかさの条件を利用して道路面の推定を行う。また、移動物体の認識では、道路上の物体の動きの特性より連続したステレオ画像上での動きに拘束を設けることにより、誤対応を回避しつつ距離と速度ベクトルを求める。ランダムドット画像及び実画像により本手法の有効性を確認した。

## Recognition of Road Surface and Moving Objects by Stereo Vision for Autonomous Land Vehicles

Jun SATO\*

Fumiaki TOMITA\*\*

\*AISIN SEIKI Co., Ltd.

\*\*Electrotechnical Laboratory

### abstract

Recognition of road environments is very important for autonomous land vehicles. In this paper we propose a recognition method of road surface and moving objects which is important for recognition of road environments. In the recognition method of road surface, road surface is reconstructed from 3D information obtained from stereo method using restriction of smoothness of road surface. In the recognition method of moving objects, distance and velocity vector of the objects are calculated using restriction of movement of the objects on the road. Experiments on random dot pattern images and real images are reported.

## 1. まえがき

走行環境を認識することは、車に自立走行機能をもたせる上で大きな課題となる。本報告では、走行環境を認識するのに特に重要な道路面の3次元形状の認識手法、及び道路上の移動体の認識手法について報告する。道路の3次元構造を復元する手法としては、道路端形状の知識にもとづく幾何学的条件を利用したものが報告されている<sup>[1][2]</sup>が道路端の形状が不明確な場合には3次元構造を復元することができない。本報告では、道路面上に存在する様々な模様、境界線等の3次元情報を両眼立体視により求め、これをもとに道路面を推定することにより、道路構造が不明確な状況にも対応可能な手法を提案する。また、道路上の移動体を認識する方法として、対象物に関する知識を利用した単眼視による方法や階層的マッチングによりロバスト性を高めた両眼立体視法<sup>[3]</sup>が開発されている。両眼立体視は距離情報をダイレクトに得られるという点ですぐれているが屋外のような複雑なシーンでは対応問題が課題として残る。本報告では、道路面の認識結果をもとに移動体の存在位置を予測するとともに、3次元空間における動きの拘束条件より、時間的に連続するステレオ画像間での誤対応を検出し正しい対応に導く時系列両眼立体視手法を提案する。

まず両眼立体視により道路面上の白線、路面表示、影等の位置を計測して道路面の起伏を認識するとともに立体物が存在するだいたいの位置を予測する。この時、合わせて道路面に対するカメラの姿勢を計算する。次に立体物の存在が予測された領域において、時系列両眼立体視により誤対応を回避しつつ位置及び動きを計測する。動きの均一性をもとに各点をクラスタリングし最終的に静止した障害物と移動体を識別する。

## 2. 道路面の認識

ステレオカメラを搭載した移動体が道路上を走行する状況を考える。図-1に示すように左右カメラのfocal pointを原点として撮像面の水平方向、垂直方向とX軸、Y軸がそれぞれ平行となるように左カメラ座標系、右カメラ座標系をとる。ワールド座標系は左カメラ座標系と原点およびX軸を合わせ、道路面に対して水平、垂直方向にそれぞれZ軸、Y軸をとる。

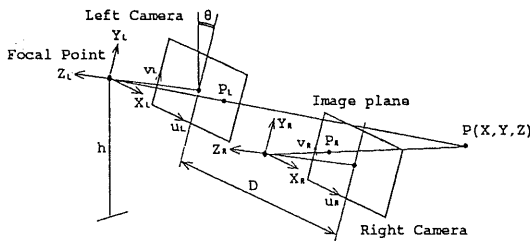


図-1 ステレオカメラモデル

カメラの道路面に対する位置関係から路面上の対象物の視差を予測しながら左右画像の対応をとる<sup>[4]</sup>。また、すでに対応のとれた手前の視差E<sub>ij</sub>をもとに次の対応点を予測することにより道路面の傾きに変化があっても対応可能である。

まず、左画像上の点P<sub>L</sub>(x<sub>L</sub>, y<sub>L</sub>)に対する右画像上の予測対応点P<sub>R</sub>(x<sub>R</sub>, y<sub>R</sub>)を式(1)、(2)により計算しその左右数画素を対応候補点とする。

$$x_R = -(x_L - D) S_{xR} / Z_L + x_{cR} \quad (1)$$

$$y_R = y_L \quad (2)$$

$$Z_L = S_{yL} \times h / (y_L - y_{cL} - S_{yL} \tan \theta) \cos \theta \quad (3)$$

$$x_L = (x_{cL} - x_L) Z_L / S_{xL} \quad (4)$$

$$y_L = (y_{cL} - y_L) Z_L / S_{yL} \quad (5)$$

ここで、x<sub>cL</sub>, y<sub>cL</sub>, x<sub>cR</sub>, y<sub>cR</sub>はそれぞれ左カメラ及び右カメラのカメラ中心のx, y座標である。またS<sub>xL</sub>, S<sub>yL</sub>, S<sub>xR</sub>, S<sub>yR</sub>は左右カメラのx方向, y方向のスケールファクタ, Dは左右のカメラ間距離, hは道路面に対するカメラ高さ, θはカメラのX軸回りの回転角度である。また、このとき同時に視差マップE(x<sub>cL</sub>, y<sub>cL</sub>)の近傍を検索し、すでに視差dが登録されている場合には式(1)のかわりに式(6)によりx<sub>R</sub>を予測する。

$$x_R = x_{cL} - d \quad (6)$$

左画像の点P<sub>L</sub>と右画像の各対応候補点との間で式(7)により原画像における明るさ(f)の相関度(C)を計算し相関度の最も高い点を対応点としその視差dを視差マップE(x<sub>cL</sub>, y<sub>cL</sub>)に登録する。また式(9)により左カメラ座標系における3次元座標(x<sub>L</sub>, y<sub>L</sub>, z<sub>L</sub>)を計算する。

$$C = 1 / \sum_i \sum_j (f(x_L + j, y_L + i) - f(x_R + j, y_R + i)) \quad (7)$$

(i, j : -3 ~ 3)

$$d = x_L - x_R \quad (8)$$

$$z_L = S_{xL} D / d \quad (9)$$

$$x_L = (x_{cL} - x_L) z_L / S_{xL}$$

$$y_L = (y_{cL} - y_L) z_L / S_{yL}$$

次に対応のとれた点が路面上の点かどうかを逐次判別する。すなわち、今y座標がn+1の点P(x<sub>n+1</sub>, y<sub>n+1</sub>, z<sub>n+1</sub>)が道路面上にあるかどうか判断する。まず、y座標がn-9 ~ nの範囲で道路面上にあると判断された点のY, Z座標 Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub> (i : n-9 ~ n) から式(10)の最小二乗法により直線を当てはめ、点Pが道路面上である場合の予測Y座標 Y<sub>n+1</sub>' を計算する。次に、点PのY座標 Y<sub>n+1</sub> と予測Y座標 Y<sub>n+1</sub>' との偏差から式(11)により点Pの属性を判定する。

$$Y_{n+1}' = a Z_{n+1} + b \quad (10)$$

$$a = S_1 / S_2$$

$$b = (\sum Y_i) / N - a (\sum Z_i) / N$$

$$S_1 = \sqrt{\sum (Y_i Z_i) - (\sum Y_i \sum Z_i) / N}$$

$$S_2 = \sqrt{\sum Z_i^2 - (\sum Z_i)^2 / N}$$

$$i : n-9 \sim n$$

N : 点の数

$$\begin{aligned} |Y_{n+1} - Y_{n+1}'| \leq 2 & : \text{道路面上にある} \\ |Y_{n+1} - Y_{n+1}'| > 2 & : \text{道路面上にない} \end{aligned} \quad (11)$$

またこの過程において、カメラ近傍の道路面上の点群から求めた直線のパラメータから式(12), (13)により道路面に対するカメラの仰角 $\theta$ 及び高さ $h$ を計算し、次の時刻の対応に備える。

$$\theta = \tan^{-1}(a) \quad (12)$$

$$h = b / \cos \theta \quad (13)$$

また量子化誤差の影響を低減するために相関値の分布を利用してサブピクセルオーダーの対応を行う。すなわち、図-2に示すように相関値が最も高い点 $P_R(x_R, y_R)$ の左右数点の相関値 $C_{x_{R+i}}$  ( $i : -a \sim a$ )を求め、それらの重心点として式(14)により最適な対応点のx座標 $x_R'$ を求めらる。

$$x_R' = x_R + \sum (C_{x_{R+i}} \times (i+a+1)) / \sum C_{x_{R+i}} - a - 1 \quad (14)$$

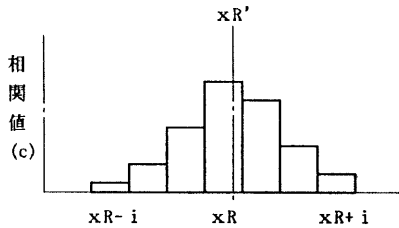


図-2 相関値分布

### 3. 立体物の存在位置予測

2. の道路面の認識過程において道路面上でない (すなわち、立体の一部) と判断された点より立体物の存在位置を予測する。視差マップ上で同一y座標上ではほぼ等しい視差を持つ2点 $P_1(x_1, y)$ ,  $P_2(x_2, y)$ を探索し、この間に立体物が存在すると予測し、2つの点の視差 $d_1, d_2$ の平均値  $d = (d_1 + d_2) / 2$  で視差マップEの2点間を矩形状に埋める(図-3参照)。矩形の高さ $h_m$ は移動体の実際の高さ $H_m$ と視差 $d$ より式(15)により求める。

$$h_m = H_m S_y L d / (S_x L D) \quad (15)$$

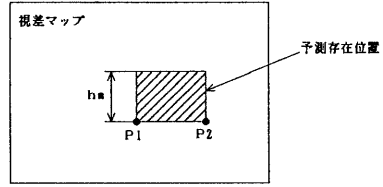


図-3 立体物の存在位置予測

また、2点の視差が大きく異なる場合は一方が他方を遮蔽していると考え、視差 $d_1, d_2$ のうち小さい方により視差マップE上の2点間を埋める。

### 4. 立体物の動き及び距離の認識

#### 4.1 処理概要

3. において立体物の存在が予測された領域内の各エッジ点に対して、時系列両眼立体視法により、連続した画像の情報を利用して両眼立体視の誤対応を回避しつつ高精度かつロバストに動き及び距離を計測する。図-4に本手法の概念図を示す。今、 $t_0, t_1, t_2$ の連続した3時刻を考える。まず $t_0$ 時刻において3. の距離予測のもとに可能性のある全ての対応候補点について対応をとり距離を計算する(①)。次に $t_0$ 時刻の各対応候補点に対して、各点は道路面に平行な平面内を動くとして $t_1$ 時刻の左右の画像のエッジ点群から動きに矛盾のない対応点のペアを選び距離を計算する(②, ③)。移動体は短時間には直線的に移動すると考え、 $t_0$ 時刻から $t_1$ 時刻への3次元速度ベクトルをもとに左右各々の画像における $t_2$ 時刻の移動位置を予測する(④)。 $t_0, t_1, t_2$ 各時刻の左右の対応点近傍の明るさ分布の相関度を評価関数として $t_0$ 時刻の各対応候補点の中で最も確からしい対応を選ぶ。

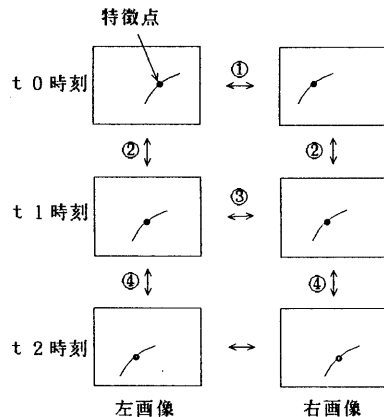


図-4 時系列両眼立体視

#### 4.2 時系列両眼立体視

図-1のステレオカメラモデルでは以下の式が成り立つ。

・左カメラ座標系

$$X_{PL} = - \frac{X_{PL}'}{Z_{PL}'} S_{xL} + X_{CL} \quad (16)$$

$$Y_{PL} = - \frac{Y_{PL}'}{Z_{PL}'} S_{yL} + Y_{CL} \quad (17)$$

・右カメラ座標系

$$X_{PR} = - \frac{X_{PR}'}{Z_{PR}'} S_{xR} + X_{CR} \quad (18)$$

$$Y_{PR} = - \frac{Y_{PR}'}{Z_{PR}'} S_{yR} + Y_{CR} \quad (19)$$

式(16)～(19)より平行に置かれた標準ステレオカメラモデルでは左右画像の座標が各々  $(X_{PL}, Y_{PL})$ ,  $(X_{PR}, Y_{PR})$  の点の3次元座標  $(X_{PL}', Y_{PL}', Z_{PL}')$  は式(20), (21), (22)となる。

$$X_{PL}' = - \frac{(X_{PL} - X_{CL}) \times S_{xR} \times D}{(X_{PL} - X_{CL})S_{xR} - (X_{PR} - X_{CR})S_{xL}} \quad (20)$$

$$Y_{PL}' = - \frac{(Y_{PL} - Y_{CL}) \times S_{xL} \times S_{xR} \times D}{S_{yL} \times ((X_{PL} - X_{CL})S_{xR} - (X_{PR} - X_{CR})S_{xL})} \quad (21)$$

$$Z_{PL}' = - \frac{S_{xL} \times S_{xR} \times D}{(X_{PL} - X_{CL})S_{xR} - (X_{PR} - X_{CR})S_{xL}} \quad (22)$$

ワールド座標系  $(X_{PL}, Y_{PL}, Z_{PL})$  とカメラ座標系  $(X_{PL}', Y_{PL}', Z_{PL}')$  の関係より

$$\begin{pmatrix} X_{PL} \\ Y_{PL} \\ Z_{PL} \end{pmatrix} = R_x \begin{pmatrix} X_{PL}' \\ Y_{PL}' \\ Z_{PL}' \end{pmatrix} \quad (23)$$

ここで  $R_x$  は X 軸回りの回転マトリックスを示す。短い時間内では対象物、自転車ともに直線的に移動すると考えると、連続する短い3時刻  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  での対象物の3次元空間での位置  $(X_{PL0}, Y_{PL0}, Z_{PL0})$ ,  $(X_{PL1}, Y_{PL1}, Z_{PL1})$ ,  $(X_{PL2}, Y_{PL2}, Z_{PL2})$  は式(24), (25), (26)となり、式(16)～(19), (24), (25), (26)より式(27), (28)の関係が成立し、 $t_2$ 時刻における2次元画像上の位置  $(X_{PL2}^*, Y_{PL2}^*)$  が  $(X_{PL0}, Y_{PL0})$ ,  $(X_{PL1}, Y_{PL1})$  より予測できる。右画像上の予測点  $(X_{PR2}^*, Y_{PR2}^*)$  も同様に式(29), (30)となる。

$$X_{PL2} - X_{PL1} = X_{PL1} - X_{PL0} \quad (24)$$

$$Y_{PL2} - Y_{PL1} = Y_{PL1} - Y_{PL0} \quad (25)$$

$$Z_{PL2} - Z_{PL1} = Z_{PL1} - Z_{PL0} \quad (26)$$

$$X_{PL2}^* = \frac{2 X_{PL1} Z_{PL1} - X_{PL0} Z_{PL0}}{2 Z_{PL1} - Z_{PL0}} \quad (27)$$

$$Y_{PL2}^* = \frac{2 Y_{PL1} Z_{PL1} - Y_{PL0} Z_{PL0}}{2 Z_{PL1} - Z_{PL0}} \quad (28)$$

$$X_{PR2}^* = \frac{2 X_{PR1} Z_{PR1} - X_{PR0} Z_{PR0}}{2 Z_{PR1} - Z_{PR0}} \quad (29)$$

$$Y_{PR2}^* = \frac{2 Y_{PR1} Z_{PR1} - Y_{PR0} Z_{PR0}}{2 Z_{PR1} - Z_{PR0}} \quad (30)$$

予測が適正であったかどうかは  $t_2$ 時刻において確かに対象物が予測位置に存在しているかどうかを確認することにより検証できる。すなわち、 $t_0$ 時刻及び  $t_1$ 時刻における両眼立体視の対応が間違っていたり  $t_0$ 時刻と  $t_1$ 時刻間の移動点の対応が間違っていた場合には  $t_0$ 時刻と  $t_2$ 時刻の間で濃淡画像における相関度が低くなる。従って、 $t_0$ 時刻における両眼対応点の相関度  $C_0$ ,  $t_1$ 時刻における両眼対応点の相関度  $C_1$ ,  $t_2$ 時刻における両眼対応点の相関度  $C_2$ ,  $t_0$ 時刻と  $t_1$ 時刻の左右画像における移動対応点の相関度  $C_{iL0}$ ,  $C_{iR0}$ ,  $t_1$ 時刻と  $t_2$ 時刻の左右画像における移動対応点の相関度  $C_{iL1}$ ,  $C_{iR1}$  が最高となる対応点の組み合わせを真の対応点と考える。すなわち、最適対応点探索の評価関数は式(31)とする。

$$E = C_0^2 + C_1^2 + C_2^2 + C_{iL0}^2 + C_{iR0}^2 + C_{iL1}^2 + C_{iR1}^2 \quad (31)$$

ところが図-5のような垂直線が移動した場合、 $t_0$ 時刻における点Aは移動点不定(例えば、 $A-B-C$ ,  $A-B'-C'$ )となり予測ができない。

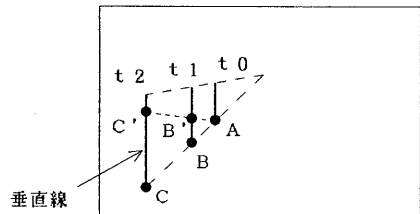


図-5 垂直線の移動

ここで、道路上を走行する車両等を考えた場合、道路面に対して垂直方向（Y方向）の移動成分 $\Delta Y$ は水平方向の移動成分 $\Delta X$ 及び $\Delta Z$ に比較して非常に小さく瞬間的には $\Delta Y = 0$ と考えられる。したがって、式（23）より式（32）が成り立つ。

$$Y_{PL0} \cdot \cos \theta - Z_{PL0} \cdot \sin \theta = Y_{PL1} \cdot \cos \theta - Z_{PL1} \cdot \sin \theta \quad (32)$$

式（32）、（20）、（22）より式（33）が導かれ、 $t_1$ 時刻における右画像の対応点のX座標 $X_{PR1}$ が $t_0$ 時刻における左右画像の対応点 $(X_{PL0}, Y_{PL0})$ 、 $(X_{PL1}, Y_{PL1})$ 及び $t_1$ 時刻における左画像の点 $(X_{PL1}, Y_{PL1})$ より一意に求まり上記の問題を回避できる。

$$X_{PR1} = - \frac{((Y_{CL} - Y_{PL1}) \cos \theta - S_{PL} \sin \theta)}{S_{XL}((Y_{CL} - Y_{PL0}) \cos \theta - S_{PL} \sin \theta)} \times ((X_{PL0} - X_{CL}) S_{XR} - (X_{PR0} - X_{CR}) S_{XL}) \quad (33)$$

(但し、 $Y_{PL0} \neq Y_{CL}$ )

### 5. 対象物の識別

4.において求めた速度ベクトルをもとに各エッジ点をクラスタリングし、移動物体や静止物等を識別する。まず、速度ベクトル $V$  ( $V_x, V_z$ )の2次元ヒストグラムをしきい値処理し、度数の大きいベクトルをグループ化し、各グループの重心点 $P_G$ を計算する。次に、2次元の速度ベクトル領域を重心点 $P_G$ を核とする距離最小の領域（ボロノイ領域）に分割する。このとき、重心点 $P_G$ からの距離が最大距離 $R_V$ 以上の場合は領域外とする（図-6参照）。最後に各エッジ点をボロノイ領域に従ってクラスタリングする。

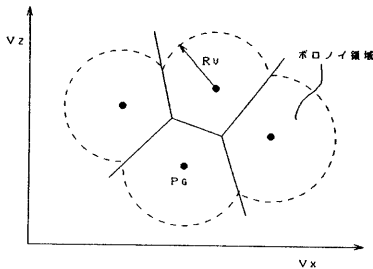


図-6 速度ベクトルによるクラスタリング

### 6. 連続画像の両眼立体視における誤対応検出能力の検証

4.で提案した手法は、両眼立体視において誤対応をおこした場合に、 $t_2$ 時刻における予測移動点と実際の画像との間でズレが発生することを利用して誤対応を取り除くものである。ここでは対象物の動きと誤対応による予測のズレとの関係を検討し、本手法の誤対応検出能力を把握する。今、図-7に示すように、2つの点 $P_A, P_B$ が存在し、それぞれ $\Delta t$ 時間に $(\Delta X_A, 0, \Delta Z_A)$ 、 $(\Delta X_B, 0, \Delta Z_B)$

だけ移動して $P_{A1} \rightarrow P_{A2} \rightarrow P_{A3}$ 、 $P_{B1} \rightarrow P_{B2} \rightarrow P_{B3}$ と移動したとする。左画像における点 $P_{A1}$ と右画像における点 $P_{B1}$ が誤対応を起こしたとすると、見かけ上の対応点 $P_{C1}$ に関して式（34）が成り立つため、点 $P_{C1}$ の座標は式（35）、

（36）となる。また、 $\Delta t$ 後の見かけ上の移動点 $P_{C2}$ の座標は式（37）、（38）となる。同様に $2\Delta t$ 後の見かけ上の移動点 $P_{C3}$ は式（39）、（40）となる。また実際の視差と予測視差とのズレ $\Delta X$ は式（41）である。

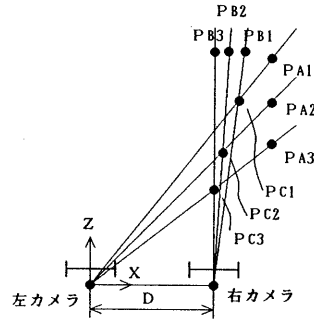


図-7 誤対応による視差ずれ

$$\frac{Z_{A1}}{X_{A1}} x = - \frac{Z_{B1}}{D - X_{B1}} (x - D) \quad (34)$$

$$X(t) = \frac{D \cdot X_{A1} \cdot Z_{B1}}{((D - X_{B1}) Z_{A1} + X_{A1} Z_{B1})} \quad (35)$$

$$Z(t) = \frac{D \cdot Z_{A1} \cdot Z_{B1}}{((D - X_{B1}) Z_{A1} + X_{A1} Z_{B1})} \quad (36)$$

$$X(t + \Delta t) = \frac{D \cdot M_{XA1} \cdot M_{ZB1}}{M_{D1} \cdot M_{ZA1} + M_{XA1} \cdot M_{ZB1}} \quad (37)$$

$$Z(t + \Delta t) = \frac{D \cdot M_{ZA1} \cdot M_{ZB1}}{M_{D1} \cdot M_{ZA1} + M_{XA1} \cdot M_{ZB1}} \quad (38)$$

$$X(t + 2\Delta t) = \frac{D \cdot M_{XA2} \cdot M_{ZB2}}{M_{D2} \cdot M_{ZA2} + M_{XA2} \cdot M_{ZB2}} \quad (39)$$

$$Z(t + 2\Delta t) = \frac{D \cdot M_{ZA2} \cdot M_{ZB2}}{M_{D2} \cdot M_{ZA2} + M_{XA2} \cdot M_{ZB2}} \quad (40)$$

$$\Delta X = \frac{X(t + 2\Delta t)}{Z(t + 2\Delta t)} S_X - \frac{2 \cdot X(t + \Delta t) - X(t)}{2 \cdot Z(t + \Delta t) - Z(t)} S_X \quad (41)$$

$$\begin{aligned} M_{XA1} &= X_{A1} + \Delta X_A & M_{XA2} &= X_{A1} + 2 \Delta X_A \\ M_{D1} &= D - X_{B1} - \Delta X_{B1} & M_{D2} &= D - X_{B1} - 2 \Delta X_{B1} \\ M_{ZA1} &= Z_{A1} + \Delta Z_A & M_{ZA2} &= Z_{A1} + 2 \Delta Z_A \\ M_{ZB1} &= Z_{B1} + \Delta Z_B & M_{ZB2} &= Z_{B1} + 2 \Delta Z_B \end{aligned}$$

今、点 $P_A$ がZ方向に0.5m/画素、点 $P_B$ がX方向に0.5m/画素で動いているとカメラからのZ方向距離とズレの大きさの関係は図-8のようになり距離が遠くなると急激に誤対応の検出が難しくなる。また、点 $P_A$ の速度を0~1m/画素の範囲で変化させると図-9のようになり、速度が大きいほど誤対応の検出が容易に行える。また、図-10に示すように左右のカメラの中心軸からX方向に離れるにしたがって誤対応の検出能力は大きくなるが、左右のカメラ各々のカメラ中心軸上では誤対応によるズレは発生しないため誤対応の検出ができない。

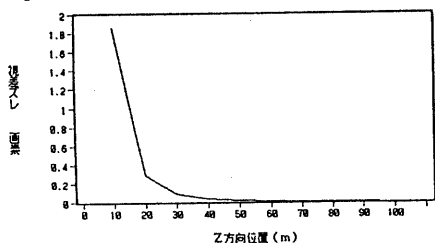


図-8 対象物のZ方向距離と誤対応検出能力の関係

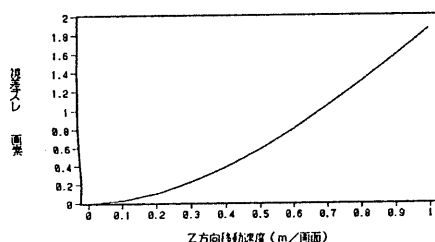


図-9 対象物の速度と誤対応検出能力の関係

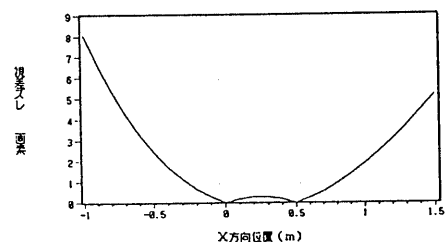


図-10 対象物のX方向距離と誤対応検出能力の関係

#### 7. 合成画像による認識率および測距精度の評価

コンピュータにより作成した合成画像によりシミュレーション実験を行い提案手法の有効性を検証する。

図-11はランダムドット50点中に規則的な動きをする2点(点A:Z方向に0.5m/画素で移動, 点B:X方向に0.5m/画素で移動)が存在するシーンの連続したステレオ画像である。ランダムドット各点は全く等しいガウス分布の明るさを持っており、1時刻のみの両眼立体視で対応点が一意に決まらない場合が多く存在する。

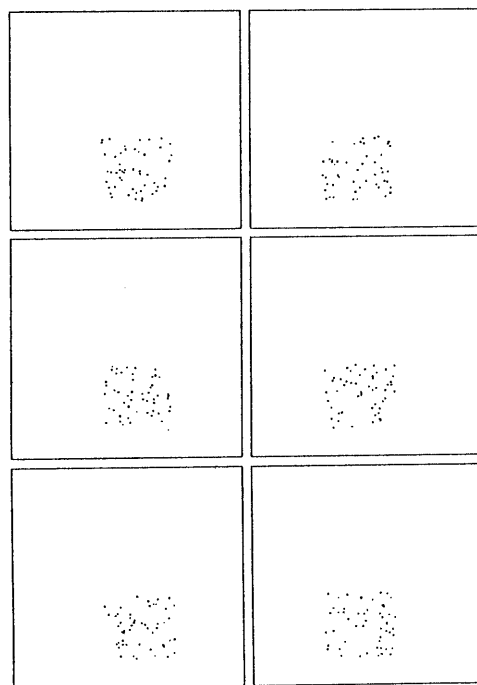


図-11 ランダムドット中の規則的な動き(上から各々、 $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ 時刻のステレオ画像)

#### (1) 誤対応削減率の評価

図-12は本研究の連続画像の両眼立体視による認識結果である。ランダムな点は直線水平運動の条件により取り除かれ、規則的な動きを持つ2点のみが検出され、その3次元位置及び動きが計測できている。ランダムドットの数を変化させ、本手法と1時刻のみの両眼立体視とで誤対応の数を較し誤対応削減率を計算した結果を表-1に示す。本手法では、1時刻のみの両眼立体視で発生していた誤対応のうち99%以上が削除され、ランダムドット(ノイズ)が増加しても誤対応の発生が極め少ない。

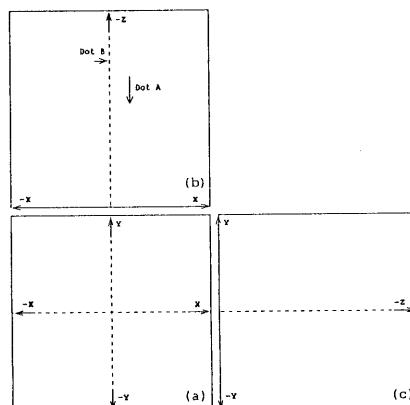


図-12 時系列両眼立体視による認識結果(a:正面図, b:側面図, c:平面図)

表-1 時系列両眼立体視の誤対応削減率

ランダムドット点数	50	75	100
単一時刻の両眼視での誤対応数( $E_s$ )	176	408	927
時系列両眼立体視での誤対応数( $E_d$ )	0	2	5
誤対応削減率( $R$ ) $R = 100(E_s - E_d) / E_s$ (%)	100	99.5	99.5

(2) 測距精度の評価

図-13にカメラから対象物までのZ方向距離を変えた場合の測距精度を示す。距離40mでの測距誤差は約0.6%であり十分な精度が得られる。

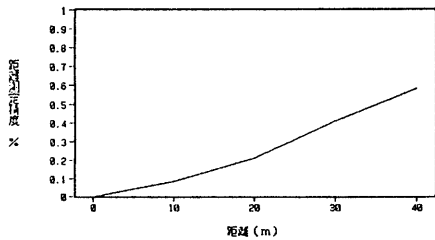


図-13 測距精度

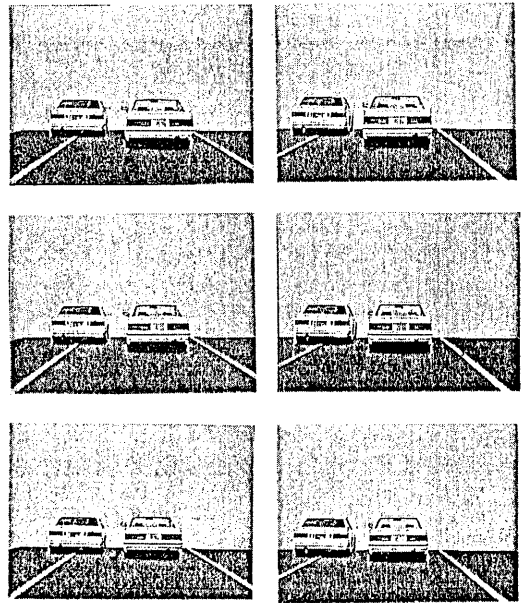


図-14 2台の車のステレオ画像  
(上から各々、 $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ 時刻のステレオ画像)

8. 実画像による実験

1/20に縮小した机上モデルにより走行シーンを作成し認識アルゴリズムの評価を行なった。図-14は移動する自動車Aと静止した自動車Bが存在するステレオの連続画像である。図-15は道路面を認識した結果であり図-16は立体物の存在領域を予測した結果である。図-17は本手法により検出した各エッジ点の速度ベクトル、およびその分布であり、車両Aに属する点と車両Bに属する点の速度の違いが明確に識別できる。図-18は速度ベクトルをもとにエッジ点のクラスタリングを行なった結果であり2台の車両が識別できている。図-19、図-20、図-21は2台の車両が重なっている場合でも識別可能であることを示す。また、図-18でクラスタリングを行なった速度ベクトルの平均は車両Aが5.065cm/画面、車両Bが0.049cm/画面であり、それぞれの実際の移動量5.0cm/画面、0.0cm/画面に対して良い精度が得られている。また、速度ベクトルの標準偏差は車両Aが0.602、車両Bが0.983であり、2つの速度ベクトル群を危険率1%で識別する場合、2つの物体の速度差は5.9cm/秒以上が必要である(サンプリング時間1/30)。即ち、実際のスケールでは速度差4.3km/h以上が必要と考えられる。

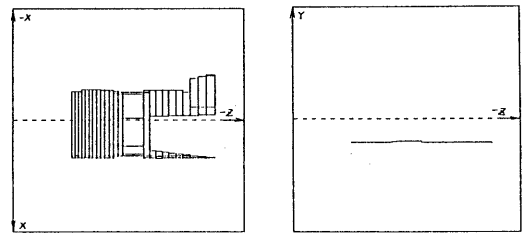


図-15 道路面の認識結果

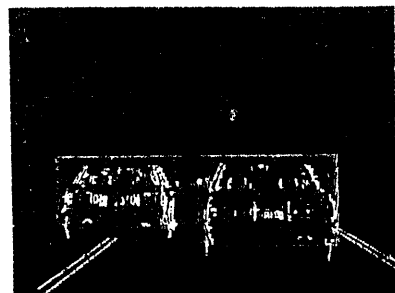


図-16 立体物の存在領域予測結果

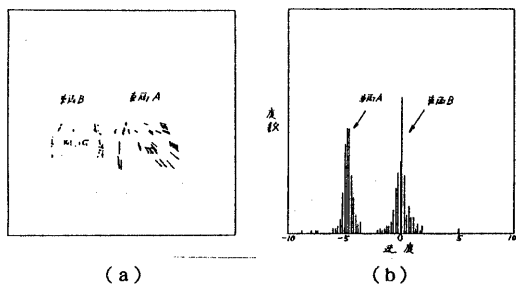


図-17 速度ベクトル検出結果  
(a:検出した速度ベクトル, b:速度ベクトルの分布)

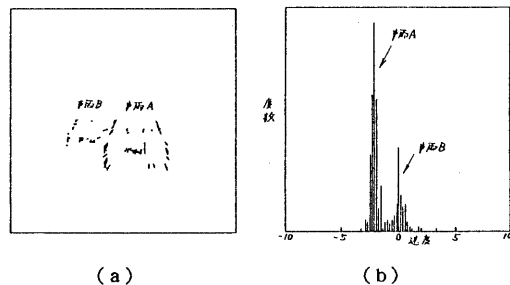


図-20 速度ベクトル検出結果  
(a:検出した速度ベクトル, b:速度ベクトルの分布)

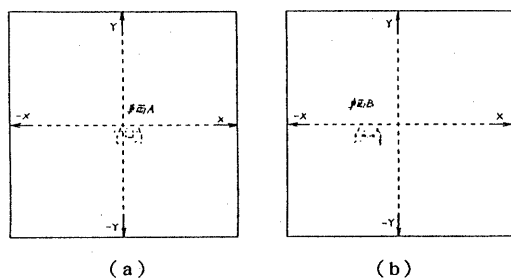


図-18 速度ベクトルによる2台の車の識別  
(a:車両A, b:車両B)

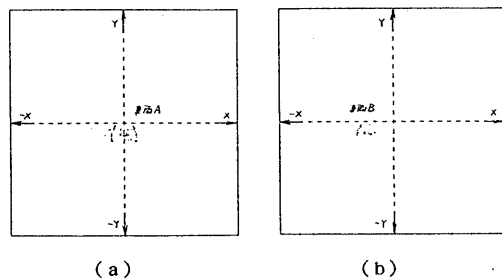


図-21 速度ベクトルによる2台の車の識別  
(a:車両A, b:車両B)

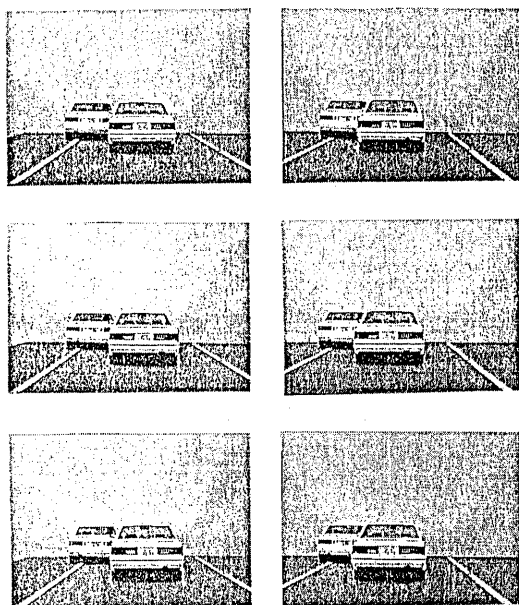


図-19 重なった車のステレオ画像  
(上から各々、 $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ 時刻の画像)

## 9. まとめ

本稿では、道路面の3次元形状を認識する手法、道路面の認識結果をもとに道路上の立体物の存在位置を予測する手法、3次元空間における車両の動きをもとに連続したステレオ画像において誤対応を検出しこれを削除する手法を提案した。道路面の認識では両眼立体視により得られた3次元情報をもとに滑らかさの条件を利用して道路面の推定を行うことにより、影やマーカ等、道路面上の様々な模様から道路面を復元することができた。移動物体の認識では、道路上の物体の動きの特性より連続したステレオ画像上での動きに拘束を設けることにより、誤対応を回避しつつ距離と速度ベクトルを同時に求める方法を開発した。本手法は空間における対応、時間軸での対応共に相関法にもとずいており、勾配法等に比べて比較的動きの大きな対象物に対しても速度ベクトルを求めることができる。

## 参考文献

- [1] 丹波, 小林, 小沢: 信学論, 車両からみた道路像の解析, Vol. J73-D, No. 1, pp.125-129(1990)
- [2] 渡辺, 金谷: 局所平面近似による道路形状復元, 情処研報, CV-62-3(1989)
- [3] A. Meygret, M. Thonnat: Segmentation of Optical Flow and 3D Data for the Interpretation of Mobile Objects, Proc. 3rd ICCV, pp. 238-245(1990)
- [4] 佐藤, 富田: 自律走行車のステレオビジョンによる道路面の認識, 信学全大秋, D-404, (1990)