

テクスチャ領域の両眼立体視

佐藤 淳
アイシン精機㈱

富田文明
電子技術総合研究所

ステレオ（両眼立体視）の対応法を大別すると、エッジ対応法と局所的相関法に分類することができる。エッジ対応法は、一様な面の対象物が散在し、距離変化の大きいシーンを解析する場合に有効である。一方、相関法は、距離変化の小さいテクスチャ面のシーンを解析する場合には有効で、面の距離情報を直接的に得られる利点がある。本論文では、一様な面の対象物とテクスチャ面の対象物が混在するようなシーンに対して、両者を区別し、エッジ対応法と相関法を相補的に併用する方法を紹介する。すなわち、左右の画像から、まず、一様な領域とともにテクスチャ領域を抽出し、領域の境界線間で対応を求める。そして、テクスチャ領域に対しては、テクスチャ領域内部の各点の対応を、境界線の対応を境界条件として、相関法によって効率よく求める方法について述べる。また、複数のテクスチャ物体が前後に重なる場合には、画像のテクスチャ領域内で距離が大きく変化し、オクルージョンが生じる。その結果、相関値が不正確になり、偽の面も生成されるので、相関値を補正し、距離変化を正しく検出する方法についても述べる。

Matching Texture Regions in Stereo Images

Jun Sato* and Fumiaki Tomita**

*AISIN SEIKI Co., Ltd.
1 Minami-machi, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi
Kanagawa 210, Japan

**Electrotechnical Laboratory
1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi
Ibaraki 305, Japan

In this paper, we propose a stereo vision to analyze a scene in which are both homogeneous objects and texture objects. First, texture regions are extracted together with homogeneous regions in a pair of stereo images, and the boundary segments of these regions are matched by the edge-based method. Next, interior points in texture regions are matched by the correlation-based method, assuming smoothness of the surfaces, from the matched boundaries using them as the boundary conditions to limit the search space for correspondence. However, when a more than one texture objects overlap, large depth gaps and occlusions occur in the texture regions in the images, which make correlations incorrect and generate false surfaces. Then, we also propose methods to correct correlations and to detect occlusions at large depth gaps to obtain the proper depth map.

1 まえがき

ステレオ(両眼立体視)は、シーンの3次元情報を得る最も一般的な方法である。その主要な問題は、ステレオ画像間で対応する点、すなわち、3次元空間上の同じ点を表わす一対の点を求めることである。この対応問題を解決するために、多くの方法が開発されてきた⁽¹⁾。それらを大別すると、エッジ対応法と局所的相関法に分類することができる。エッジ対応法は、一様な面の対象物が散在し、距離変化の大きいシーンを解析する場合に有効であるが、面の距離情報を得るためには内挿が必要である⁽²⁾。一方、相関法は、距離変化の小さい滑らかに変化するテクスチャー面のシーンを解析するには有効で、面の距離情報を直接的に得られる利点があるが、計算量は多くなるので、対応探索範囲をできるだけ小さくする必要がある。

本論文では、一様な面の対象物とテクスチャー面の対象物が混在するようなシーンに対して、両者を区別し、エッジ対応法と相関法を相補的に併用する方法を紹介する。すなわち、左右の画像から、まず、一様な領域とともにテクスチャー領域を抽出し、領域の境界線間で対応を求める。そして、テクスチャー領域に対しては、テクスチャー領域内部の各点の対応を、境界線の対応を境界条件として、相関法によって効率よく求める方法について述べる。また、複数のテクスチャー物体が前後に重なる場合には、画像のテクスチャー領域内で距離が大きく変化し、オクルージョンが生じる。その結果、相関値が不正確になり、偽の面も生成されるので、相関値を補正し、その距離変化を正しく検出する方法についても述べる。

2 ステレオの原理

左右2台のカメラは、図1のように、その光軸が平行でかつカメラ間を結ぶ基線に直交している場合を考える。空間中の点P(x, y, z)の各画像への投影像を $P_L(x_L, y_L)$ 、 $P_R(x_R, y_R)$ とする。問題は、点Pが未知であるので、画像上で P_L と P_R が同じ点を表わすことを知ることである。すなわち、左右の画像の多くの点からシーンの同じ部分を表わす点の対を求めなければならない。対応点の間には、幾何学的な拘束条件から、次の関係がある。

$$\begin{aligned} x_L &> x_R \\ y_L &= y_R \end{aligned} \quad (1)$$

すなわち、一方の画像上の点に対応する他方の画像上

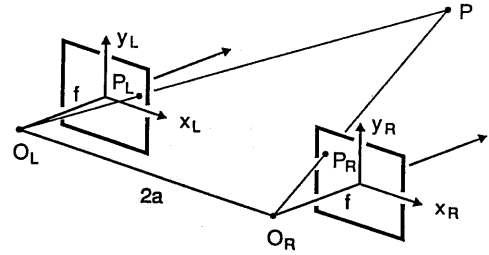


図1 ステレオカメラモデル。

の点は、同じ水平走査線(エピポーラ線)の半直線上に存在する。したがって、対応点を求めるには、エピポーラ線上に類似する点を探索することになる。そして、 P_L と P_R が対応していることがわかれば、点Pの距離zは、 P_L と P_R のx座標の差 $d = x_L - x_R$ (視差)から、次式によって計算することができる。

$$z = \frac{2af}{d} \quad (2)$$

3 画像の分割

エッジ対応法では、まず、画像からエッジを抽出する。図2のように、テクスチャーのある画像に対して、エッジ検出法⁽³⁾によって、明るさの一様性だけに基づいて画像の分割を行なうと、テクスチャーの部分では、図3のように、小さな領域が多数生成される(分割①)。このままでは、エッジが多過ぎてエッジによる対応は困難であるし、初めから相関法を適用するには探索範囲が大き過ぎる。そこで、画像の各点に対して一定の大きさの近傍内のエッジ点の数を計算し、テクスチャーの部分で、図4のように、エッジ密度の高い領域として抽出することによって、微小なエッジを減らすことができる(分割②)(さらに、テクスチャー領域を、性質の異なるテクスチャー領域に分割することもできるが、今回の実験では行っていない)。しかし、エッジ密度の計算には、ある程度の大きさの近傍を必要とするために、得られる領域の境界線がぼけてしまうだけでなく、一様な領域を浸食してしまう。そこで、分割①と分割②の結果を相補的に組み合わせることにより、境界線の鮮明なテクスチャー領域を、一様な領域とともに、抽出する方法を提案する。

簡単に言うと、分割①の領域の中で、図5のように、その境界線の大半が分割②の領域に含まれている

領域を部分テクスチャー領域とし、隣接する部分テクスチャー領域を統合すると、境界線の鮮明なテクスチャー領域を抽出することができる。その具体的な処理は、他の一様な領域のラベル付け⁽⁴⁾と同時に行なわれ、テクスチャー領域をテクスチャー領域としてラベル付けする高速アルゴリズムを開発した。その詳細は他の文献に譲るとして、ここではその概略を述べる。分割①の画像に対して、以下の処理を繰り返し行なう。

- ① ラスタ走査により、ラベル付けされていない新しい領域内の点を探す。
- ② 領域の外周境界を追跡しながら、境界上の点に新しい領域番号（通し番号）をラベル付けすると同時に、分割②の領域内にある点の個数 m をカウントする。
- ③ その個数 m と境界上の点の総数 M の比が一定値以上の場合には部分テクスチャー領域と判定し、再び境界を追跡することにより、境界上の点にテクスチャーマークをラベル付けする。
- ④ 境界上の点のラベルをラスタ走査により伝播させて、領域内部の点をラベル付けする。但し、領域内に穴が存在する場合は、穴に対する内周境界を追跡することにより、境界上の点にその領域のラベルを付ける。

すべての領域がラベル付けされた後、テクスチャーマークをラベル付けされた領域が隣接している場合は、それらを統合する。そして、その結果生じる新しい領域に対して、他の一様な領域と区別するため、別の通し番号をラベル付けする。図6に、テクスチャー領域の抽出結果を示す。

4 領域の境界線の対応

そこで、エッジの対応を求めることになるが、画像データとして、CADの分野で開発された最も一般的なソリッドモデルである3次元B-rep (Boundary Representation) の仕様にしたがって開発された、画像の2次元B-rep⁽⁵⁾を利用する。これは、画像の中間表現として用いられ、もとの画像を再構成するのに十分な情報を持つだけでなく、多くの高レベルの後処理に有効に使うことができる。以下にその概要を述べる。

各領域は、1つの外周境界線と、幾つかの穴が存在



図2 メロンがあるシーンのステレオ画像。

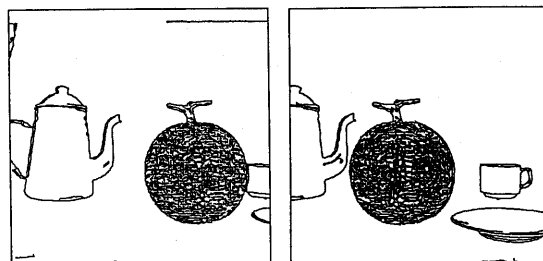


図3 明るさの一様性に基づく画像の分割①。

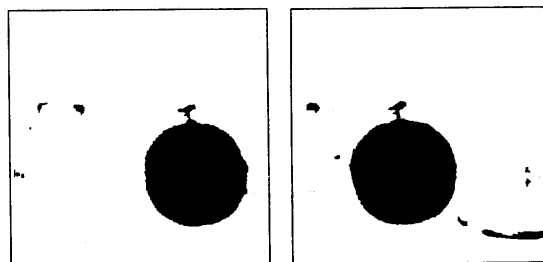


図4 エッジ密度に基づく画像の分割②。

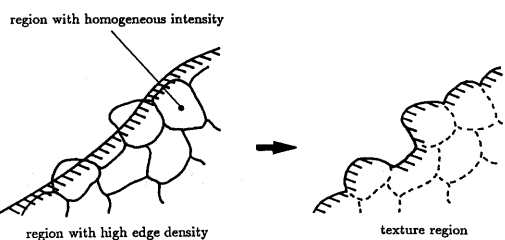


図5 部分テクスチャー領域の抽出と統合。

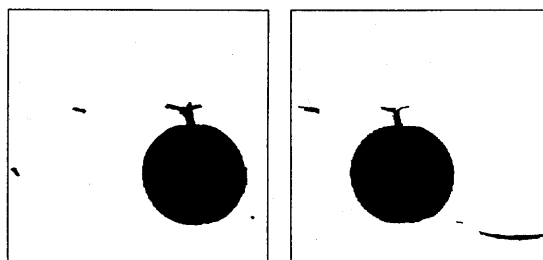


図6 テクスチャー領域の抽出結果。

すれば、穴との内周境界線のリストによって表現される。そして、各境界線は、それを構成する境界線セグメントのリストによって表現される。各セグメントは、領域を右側に見るように方向付けられており、直線または2次曲線の方程式により近似される。図7に、図6の領域の境界線セグメントを示す。

ステレオ画像間の対応処理は、このデータ構造上で行なわれる。対応の単位として、境界線セグメントが用いられる^(*)。図8は、左右の画像で対応の得られたセグメントを示す(但し、水平セグメントは除いている)。

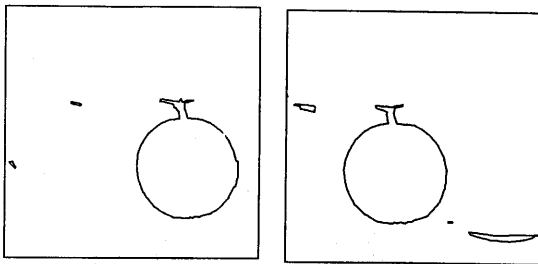


図7 境界線セグメント。

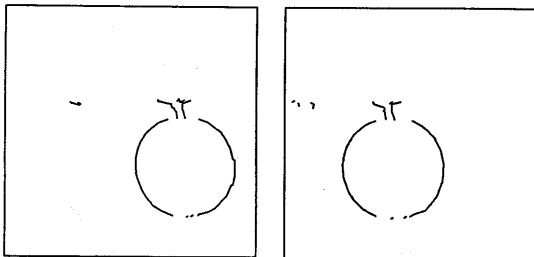
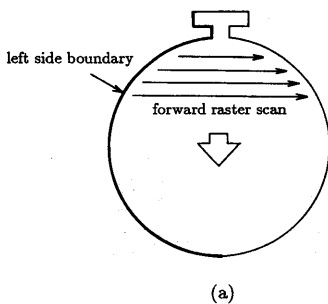
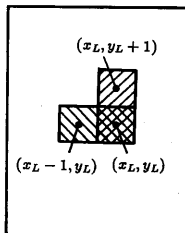


図8 セグメントの対応結果(水平セグメントを除く)。

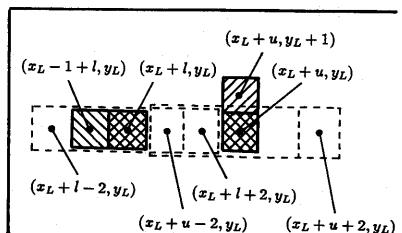


(a)

< left image >



< right image >



(b)

図9 対応点探索:(a)順方向ラスタ走査;(b)探索範囲。

5 領域の内部点の対応

次に、テクスチャ領域内部の点の対応を相関法により求めるが、境界線上の点の視差を境界条件として利用することにより、各点の対応探索範囲を小さく(実験では5画素に)することができる。テクスチャ領域の境界線上の点のみの視差分布図Dから出発して、順方向ラスタ走査による初期対応と逆方向ラスタ走査による対応の補正の過程を経て、完全な視差分布図Dと相関分布図Eを作成する。

5.1 順方向ラスタ走査

左画像の左上の点から順方向にラスタ走査し、以下の相関法により対応点を求める処理を繰り返す(図9)。

- ①テクスチャ領域内の点で対応の得られていない点 $P_L(x_L, y_L)$ を探す。
- ②点 P_L の左の点の視差 $l = D(x_L-1, y_L)$ と点 P_L の上の点の視差 $u = D(x_L, y_L+1)$ を調べる。
- ③ l または u の視差がすでに計算されている場合は、視差が $l-2 \sim l+2$ と $u-2 \sim u+2$ の相関値を計算する。左右の画像を I_L, I_R とすると、相関の計算に大きさ $(2n+1) \times (2n+1)$ の近傍を用いた場合に、視差が d の相関値は次式で与えられる。

$$e(x_L, y_L, d) =$$

$$\sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n |I_L(x_L+u, y_L+v) - I_R(x_L+d+u, y_L+v)|$$

(3)

- ④ 視差が d^* の点で最良の相関値 e^* が得られたとすると、 $D(x_L, y_L) = d^*$ 、 $E(x_L, y_L) = e^*$ とする。

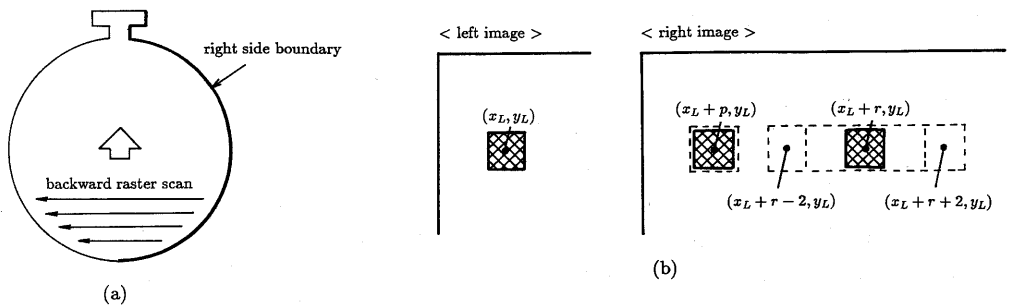


図10 対応点補正:(a)逆方向ラスタ走査;(b)補正範囲.

5.2 逆方向ラスタ走査

上記の処理は、領域の左側の境界線しか利用していないので、領域の右側の境界線も利用し、両分布図を校正する。左画像の右下から逆方向にラスタ走査し、次の処理を繰り返す(図10)。

- ① テクチャー領域内の点 $P_L(x_L, y_L)$ を探す。
- ② 点 P_L の視差 $p = D(x_L, y_L)$ と点 P_L の右の点の視差 $r = D(x_L + 1, y_L)$ を調べる。
- ③ p と r が非常に異なる場合は、視差が p と $r - 2 \sim r + 2$ の相関値を計算する。
- ④ 視差が d^* の点で最良の相関値 e^* が得られるとすると、 $D(x_L, y_L) = d^*$, $E(x_L, y_L) = e^*$ とする。

図11は、図2のメロンの視差分布図を示すが、メロンの曲面が正しく得られていることがわかる。また、図12のクリスマスツリーの視差分布図を図13に示すが、その面が必ずしも滑らかではない対象物に対しても、適用可能であることがわかる。

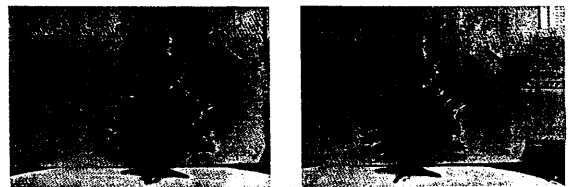


図12 クリスマスツリーがあるシーンのステレオ画像.

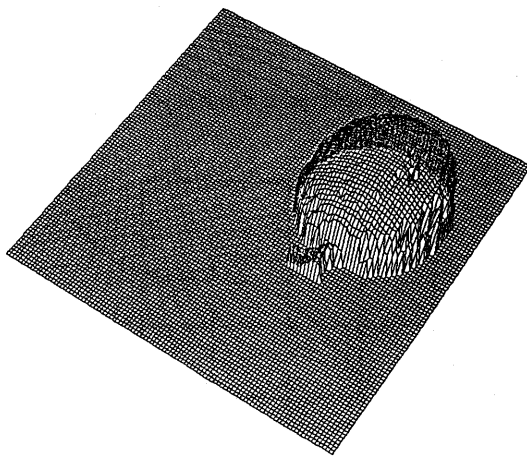


図11 メロンの視差分布図.

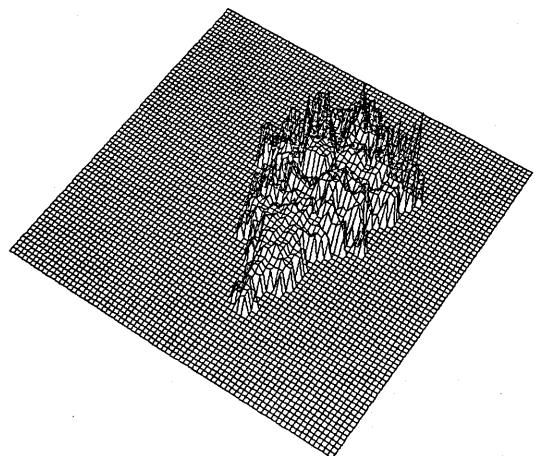


図13 クリスマスツリーの視差分布図.

6 オクルージョンの検出

上記の方法は、原則的に、テクスチャー面は滑らかに変化していることを前提としている。しかし、複数のテクスチャー物体が前後に重なることにより、画像のテクスチャー領域内で距離が大きく変化する部分が生じる場合がある。相関法は、ある一定領域の相関値を用いるため、このような部分では、視差および相関値は不正確になりやすい。また、図14のように、左右画像のうち一方では見えるが、他方では見えないオクルージョン部分では、偽の面が生成される。例えば、図15の2つの円筒のシーンに対して、上記の方法を適用した結果得られる視差分布図と相関分布図を図16に示す。そこで、次に、距離変化の大きい部分の不正確な視差と相関値を改善する方法、および、オクルージョン部分を検出し、削除する方法について述べる。

6.1 相関のための選択的近傍

まず、各分布図を改善するために、相関の計算に選択的近傍⁽⁴⁾を利用する方法を提案する。

今、図17のように、注目点 (x, y) の周囲に5つの近傍 $N(x, y)$, $N(x+n, y+n)$, $N(x-n, y+n)$, $N(x-n, y-n)$, $N(x+n, y-n)$ を考える。この注目点の周囲では、距離が大きく変化しているが、5つの近傍のうち、少なくとも1つの近傍が滑らかな面内にある。そこで、これらの近傍を比較して、最も相関値の良い近傍の視差と相関値を利用する。左画像をラスタ走査して、以下の処理を行なうことにより、最初の視差分布図 D および相関分布図 E から、補正された分布図 D^* および E^* を得ることができる。尚、この処理では、最初に計算した相関値を利用するため、新たな相関値の計算を必要としない。

- ① テクスチャー領域内の点 $P_L(x_L, y_L)$ を探す。
- ② 5つの点の相関値 $E(x_L, y_L)$, $E(x_L+n, y_L+n)$, $E(x_L-n, y_L+n)$, $E(x_L-n, y_L-n)$, $E(x_L+n, y_L-n)$ を調べて、最も良い相関値 e^* が得られた点の視差を d とする。
- ③ 点 (x_L, y_L) における画素値と、視差が $d-1$, d , $d+1$ である右画像の点の画素値を比較する。
- ④ 最も近い画素値を持つ点の視差を d^* とすると、新しい分布図 D^* および E^* の (x_L, y_L) の値として、それぞれ d^* および e^* を書き込む。これは、図18のように、傾斜している面上の点 P の視差として点 Q の視

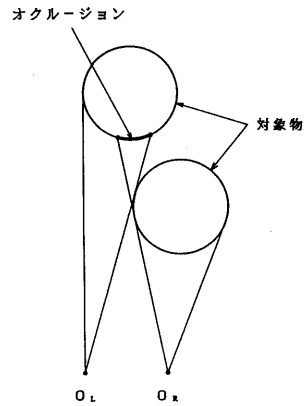


図14 オクルージョン。

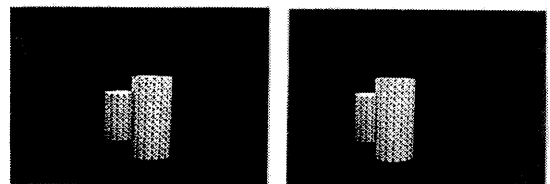


図15 2つの円筒があるシーンのステレオ画像。

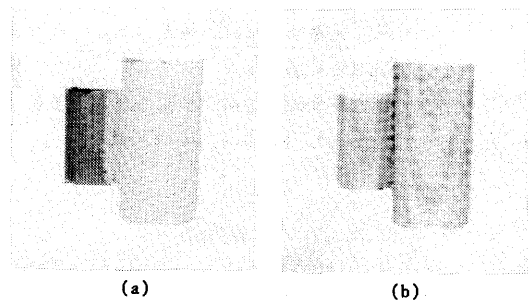


図16 初期対応の結果:(a)視差分布図;(b)相関分布図。

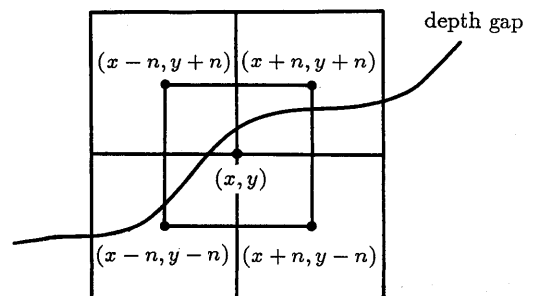


図17 5つの近傍。

差を選んだ場合、点Pと点Qのn点の間でわずかな視差のずれ Δd が生じるからである。

以上の処理の結果、図19のように、特に距離変化の大きい部分が改良された視差分布図D*および相関分布図E*が得られる。

6.2 多重対応の除去

ステレオでは、左右両画像から見える部分についてのみその距離を求めることができる。しかし、3次元シーンでは、前方の物体が後方の物体を一部隠しているような場合、一方の画像からは見えるが、もう一方の画像からは見えないようなオクルージョンが生じる。上記の相関法では、テクスチャ領域内のすべての点について対応点を求めるため、オクルージョンが存在すると、視差分布図において多重対応が起こる。すなわち、同じ点に複数の点に対応する場合がある。しかし、実際には正しい対応点はただ一つであり、他

は誤対応である。一方の画像では見えないような点は、対応点がない点であり、視差分布図からは削除すべき点である。削除しないと、図19のように、偽の面が生成される。

今、 $x_L' = X(x_R, y_R)$ を、右画像の点 (x_R, y_R) の左画像における対応点のx座標とする。左画像をラスタ走査して、次の処理を行ない、対応点のない点を削除する。

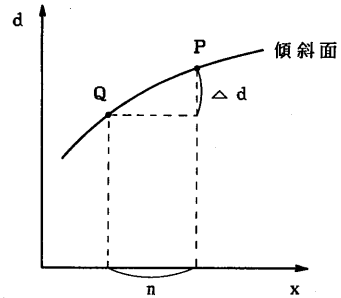
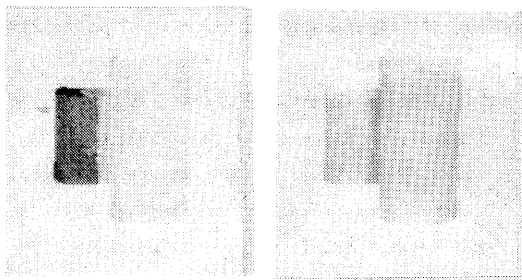
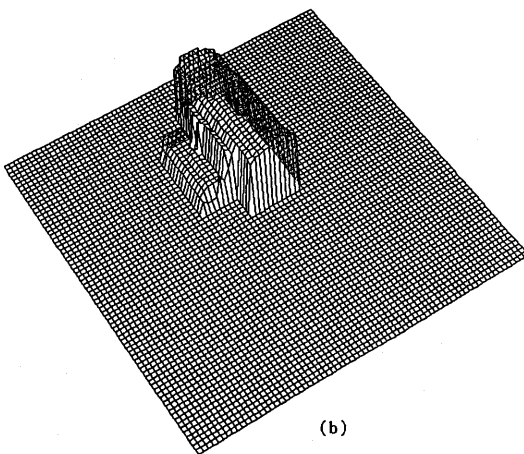


図18 傾斜面での視差のずれ。



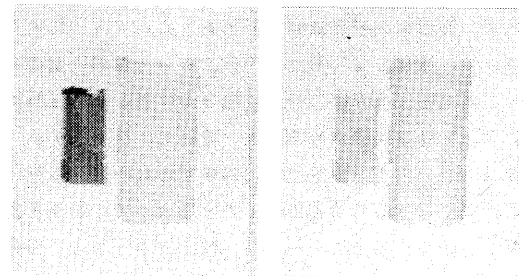
(a)

(c)



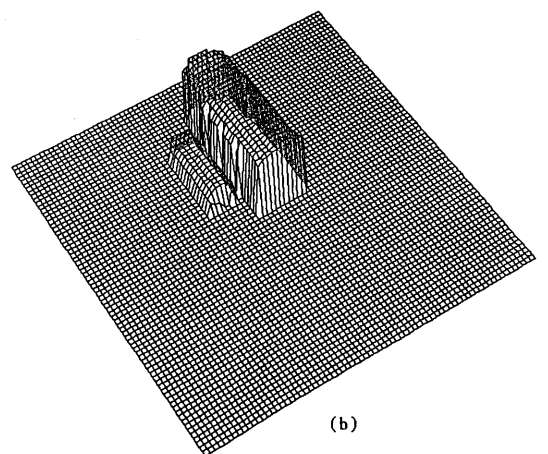
(b)

図19 対応の補正の結果:(a)-(b)視差分布図;(c)相関分布図。



(a)

(c)



(b)

図20 誤対応の削除の結果:(a)-(b)視差分布図;(c)相関分布図。

- ① テクスチャ領域内の点 (x_L, y_L) を探す。そして、その右画像における対応点を (x_R, y_R) とする。
- ② x_L と $x_L' = X(x_R, y_R)$ が異なっている場合は、相関値 $E^*(x_L, y_L)$ と $E^*(x_L', y_L)$ を比較する。
- ③ 点 (x_L, y_L) の方が良い相関値である場合、 $X(x_R, y_R)$ の値を x_L とし、点 (x_L', y_L) は、オクルージョンのために対応点がない点であるとみなし、視差分布図の $D^*(x_L', y_L)$ の値を削除する。逆に、点 (x_L', y_L) の方が良い相関値である場合は、 $D^*(x_L, y_L)$ の値を削除する。

図20に、対応点のない点を削除した視差分布図と相関分布図を示す。偽の面が消失していることがわかる。

7 まとめ

本論文では、一様な物体とテクスチャ物体の混在するシーンの両眼立体視の問題として、(1)左右の画像から一様な領域とともにテクスチャ領域を抽出する方法、(2)領域の境界線間で対応を求める方法、(3)テクスチャ領域に対しては、テクスチャ領域内部の各点の対応を、境界線の対応を境界条件として、相関法によって効率よく求める方法、そして、テクスチャ領域内での大きな距離変化に対処するために、(4)相関の計算に選択的近傍を用いることによって相関値と視差値を改善する方法、および、(5)オクルージョン部分

を検出し、削除することによって偽の面を生成しない方法、について述べた。

今後、本手法をテクスチャの多い屋外を移動するロボットの眼として適用し、その世界モデルの構築と更新に利用する予定である。

謝 辞

日頃有益な助言と討論をいただき、電子技術総合研究所視覚システム研究室大島正毅室長はじめ研究室の皆様へ感謝いたします。

参考文献

- (1) Barnard, S. T. and Fischler, M. A.: Computational Stereo, Computing Surveys, 14, pp. 553-572 (1982).
- (2) 杉本, 高橋, 富田: ステレオによるシーンの解釈, 情処会コンピュータビジョン研報, 55-4 (1988).
- (3) 富田, 高橋: 画像のB-REPのためのアルゴリズム, 信学会パターン認識・学習技報, PRU86-87 (1987).
- (4) 高橋, 富田: 境界線追跡を用いたラベル付けアルゴリズム, 情処会35全大 (1987).
- (5) 富田, 高橋: ステレオ画像の境界線表現に基づく対応, 信学論, J71-D, 6, pp. 1074-1082 (1988).
- (6) Tomita, F. and Tsuji, S.: Extraction of Multiple Regions by smoothing in Selected Neighborhoods, IEEE Trans., SMC-7, 2, pp. 107-109 (1977).