

セグメントベーストステレオにおける連結性に基づく対応評価

河井良浩[†] 植芝俊夫[†] 石山 豊^{††}
角 保志[†] 富田文明[†]

境界線表現で記述されたステレオ画像間の対応探索において、領域の境界線を構成するセグメントの連結性に基づいた対応評価法について述べる。セグメントは直線と曲線で表され、エッジ条件などを満足する画像間のセグメントの組合せ（ペア）に対して、まず局所的な類似度を計算する。ペア間の連結性を距離、輝度、角度によって評価し、基準画像の境界線に類似したセグメント系列（パス）をもう一方の画像から求める。各ペアの類似度の総和を最大とする最適パスを求め、より大域的な類似度を計算する。各ペアに与えられた類似度を基に誤対応、多重対応除去などの対応評価を行い、3次元形状を復元する。本手法は連結性を考慮しているため、オクルージョンに対して比較的頑健である。得られる幾何データは単なる3次元形状データではなく、3次元物体の認識や追跡に利用可能な構造を有している。実験結果から本手法の有効性を示す。

Stereo Correspondence Using Segment Connectivity

YOSHIHIRO KAWAI,[†] TOSHIO UESHIBA,[†] YUTAKA ISHIYAMA,^{††}
YASUSHI SUMI[†] and FUMIAKI TOMITA[†]

This paper presents a method to search for stereo correspondence based on the connectivity of segments. The data structure is defined by boundary representation. The free curve can be treated by this data structure not as a straight line approximation, but as a curved line. Some candidates for correspondence pairs consist of two segments in left and right images under epipolar and other conditions. The connectivity of two pairs is decided by their distance, intensity, and angle, based on each boundary in the left image. The similarity of paths, which are sequences of pairs, is evaluated. The main feature of our method is that it can evaluate in general situations because the similarity is calculated based on the connectivity of pairs. Mis-correspondence and multiple correspondence between pairs are removed using this similarity, and the 3D structure is reconstructed. Applications of our work include recognition for free form objects and tracking in 3D space.

1. はじめに

ステレオ画像における対応探索に関する研究は数多くなされているが¹⁾、輝度値の局所的な相関値の類似性から対応を求める相関法がよく用いられている。しかし、画像間の局所的な類似性だけでは探索空間が大きく、正しい対応関係を求めることは難しい。そのため、大域的な類似性も考慮の対象とした粗密解析法^{2),3)}、動的計画法^{4),5)}、構造解析法^{6)~10)}などの研究が進んでいる。

このうち構造解析法は、他の多くの方法が基本的にはエッジ点を対応単位としているのに対し、より高次

なエッジセグメントなどを対応単位としている。この方法は処理が複雑になる反面、単位数が激減し、対応単位ごとに形状、輝度などの多くの特徴を持つので、探索空間をかなり狭めることができる。そして、カメラの特性などによる画像間での輝度対応の多少のずれに関して比較的頑健であり、復元結果が3次元構造記述そのものになりうるため、モデリングや物体認識などに直接利用できる点が特徴である。しかしながら、特徴抽出は情報の欠如が生じることであり、対応候補が多くなればなるほど、その対応探索も難しくなる弊害がある。また、2眼視ステレオの場合、エッジの対応・復元に関してエッジ線上に垂直な方向のエッジ部分の対応探索のみで、復元（特に水平方向のセグメント）に関しては不完全な手法や、直線セグメントのみを対象にした手法が多い。

一方産業界では、多品種・少量生産に必要とされる

[†] 電子技術総合研究所

Electrotechnical Laboratory

^{††} スタンレー電気株式会社 技術研究所

Stanley Electric Co., Ltd., R&D

3次元モデルの自動生成、認識システムなどの必要性が求められている¹¹⁾。我々のグループではこれに応える解として、画像入力から、特徴量抽出、対応探索処理、3次元復元、モデル生成、そして認識までカバーする多分野・多目的に利用できる汎用の3次元視覚システム **VVV** (Versatile Volumetric Vision)¹²⁾を開発している。本手法は、その中心部をなすセグメントベースステレオに関するものである。このシステムによる物体(多面体～自由曲面体)認識^{13),14)}、トラッキング¹⁵⁾、ロボットとの協調作業¹⁶⁾などの成果をあげており、次世代ロボットの高機能ハンドリング用3次元視覚システム¹¹⁾の実現や、視覚障害者用の視覚システム¹⁷⁾、CAD/VRなどの3次元データベースの入力システムとしての応用を目指している。

本手法は、先の特徴を有する構造解析法に属する方法であり、対応単位をセグメントとして、画像間で同じ形状の輪郭線の対応関係を求める方法である。従来の方法に比べ、セグメント単位の局所的な対応関係探索ではなく、輪郭線というより大局的な特徴量を基に対応評価を行うため、オクルージョンが発生した場合、その近辺のセグメントの対応関係は一般に不安定になりがちであるが、連結しているセグメントから得られる情報を利用することで、より安定した対応を求めることができる。また、他の方法では対応セグメントを直線近似して3次元復元を行うものが多かったが、本手法では対応単位となるセグメントを直線と曲線に分類しているため、任意の形状を扱うことが可能であり、曲線部分の復元精度も良くなる。復元結果はセグメントベースの3次元物体認識や運動追跡などに直接利用できる構造となっている点も本手法の特徴である。そして、得られる境界線部分の対応結果は、輝度値の局所的な相関により対応を求める相関法にも適用できる。すなわち、境界線部分の対応関係を相関値計算の境界条件(初期値)とすることで、効率良く、かつ、正しい対応関係を求めることができ、局所的な相関法と大局的な構造解析法を統合した方法に拡張可能な点も特徴である。

本手法の具体的な処理の流れは以下のとおりである。まず画像を境界線表現に変換し、エピソード条件、輝度などからセグメント間の対応候補を求め、局所的な類似度を計算する。セグメントどうしの連結評価を近距離性、同輝度性、同角度性によって行い、この連結性に基づいて基準となる画像の境界線と類似したセグメント列をもう一方の画像中から求め、先に求めた局所類似度からより大局的な類似度を計算する。この類似度をセグメント間の評価基準として、誤対応除去、

多重対応除去を行い、画像間のセグメントの正しい対応を求め、3次元復元を行う。セグメントの連結を考慮しているため、エピソード線に水平になるセグメントの復元も可能である。

本論文ではこの提案手法のうち、セグメントベースステレオにおけるセグメント間の連結性を求める方法、誤対応・多重対応除去の対応評価法、および3次元復元法の処理を詳細に述べ、実験結果を基に本手法の有効性を示す。なお、全体の処理過程において、初期対応候補探索と対応パス探索の処理に関しては文献20), 21)に詳細に記載してあるので、簡潔な説明にとどめる。

2. 境界線表現

対象画像に対してエッジ検出、細線化、延長処理、小領域除去を行うことにより境界線を抽出する。この境界線の特徴点で分割して各区間をセグメントと定義する¹⁸⁾。特徴点は、分岐点(境界線が枝分かれする点)、屈曲点(法線方向が急激に変化する点)、変曲点(凹凸属性の異なる曲線がなめらかに接続する点)、遷移点(曲線と直線がなめらかに接続する点)である。

境界線は2つの異なる領域の境界であり、両方の領域で意味のある線なので、セグメントの方向を領域を右に見込むように表裏両側に定義する。各セグメントは前後、および裏のセグメントへのポイントがある winged-edge 構造になっており、セグメントは点列で構成される。このような領域、境界線、セグメント、点の4階層で表現されたデータ構造を2D B-Rep (Boundary Representation)と定義する(図1)¹⁹⁾。ステレオ対応においては、この2D B-Repのセグメントを単位にして処理を行う。

本ステレオでは図2に示すように、2台のカメラの光軸方向が平行である標準ステレオカメラモデルに変換する²⁰⁾。これにより、セグメントに属する画像上の各点(col,row)は以下の式で標準ステレオカメラ系の座標(X,Y)に変換され、エピソード条件は $Y_L = Y_R$ となる。

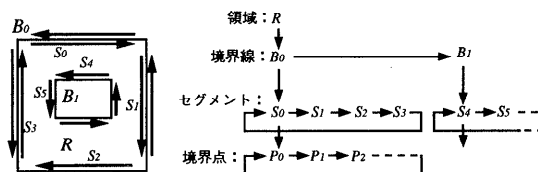


図1 画像の境界線表現

Fig. 1 Boundary Representation (B-Rep).

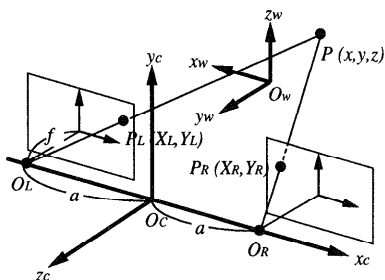


図2 標準ステレオカメラモデル
Fig. 2 Standard camera model.

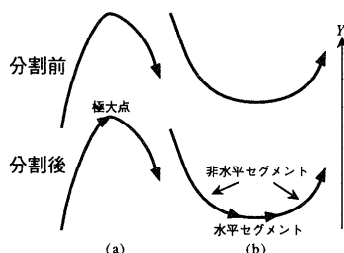


図3 曲線セグメントの分割
Fig. 3 Segmentation of curved line.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} col \\ row \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$m = m_{31}col + m_{32}row + m_{33}$$

ステレオにおいてはエッジポラ線と平行なセグメントは対応関係が不定になりやすいため、図3に示すように切り分けて扱う必要がある。曲線セグメントにおいて、構成する点列を Y 値について見た場合に、(a) 極大/極小になる点について分割を行う。また、(b) エッジポラ線と平行な部分を含む場合は Y 値を基に水平部分とそれ以外のセグメントに分割する。これらの処理により、非水平セグメントにおいては、構成する点列は Y 値について見ると単調増加（減少）が保証される。

3. 2D B-Rep から 3D B-Rep へ

2章の処理で 2D B-Rep 化されたステレオ画像に対して、基準画像（以後、実際の処理に合わせて左画像とする）の境界線に基づいて図4の手順で処理を行う。つまり、図5の B-Rep の例では、形状、輝度などの特徴を利用して、左画像のセグメント $l_1 \sim l_6$ で構成される境界線と類似したものをもう一方の画像（右画像とする）のセグメント群 $r_1 \sim r_7$ から検索し、左

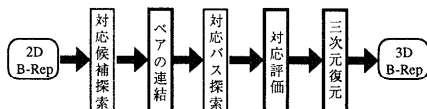


図4 処理手順
Fig. 4 Flow chart of stereo method.

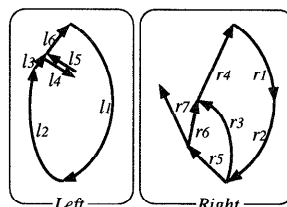


図5 B-Rep 例
Fig. 5 An example of B-Rep.

右のセグメント間の対応を求め、3次元復元を行う。

以下に 2D B-Rep から 3D B-Rep への変換処理の各過程について説明するが、本論文では、未発表部分である図4の太枠部分の「ペアの連結」、「対応評価」、「3次元復元」処理を中心に述べる。「対応候補探索」および「対応パス探索」に関しては、それぞれ文献20)、21)に詳細に記載されている。

3.1 対応候補探索²⁰⁾

前処理として、エッジポラ条件、セグメント間の輝度、方向（弦）、形状（直線、凹曲線、凸曲線）から対応候補を選ぶ。この処理により得られた対応候補を以下のように定義する。

ペア $[l, r]$: l とその対応候補である r の組合せ
各ペアは左右の画像のセグメント l, r の対応区間と類似度 (S_{pair} と定義) を有する。対応区間は Y 値が共通な区間を意味し、 S_{pair} はこの段階では対応区間の長さ、および輝度差を反映した以下の式で求まる局所的な類似度を与える。

$$S_{pair} = \frac{I_{thr}}{I_{dif} + I_{thr}} d,$$

$$I_{dif} = \begin{cases} (I_l - \Delta I_l) - (I_r + \Delta I_r) : I_l > I_r \\ (I_l + \Delta I_l) - (I_r - \Delta I_r) : \text{otherwise} \end{cases}$$

I_{thr} : 対応候補と見なす輝度差のしきい値,
 I_{dif} : 輝度の相違度,
 $I_{l(r)}$: セグメント $l(r)$ の輝度値,
 $\Delta I_{l(r)}$: セグメント $l(r)$ の微分値,
 d : 対応区間の長さ

曲面の境界線である遮蔽輪郭線部分考えた場合、その部分の輝度は左右で多少異なる可能性が大きいため、上式のように局所的な輝度変化を考慮した類似度を用

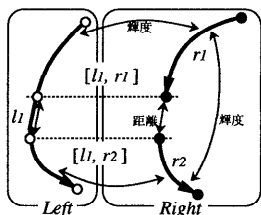


図6 連結性チェック (Step1)

Fig. 6 Check the connectivity of segments (Step1).

いる。

また、入力データが多眼視データであるとき、対応検証用として他の視点からのデータを利用できる。得られたペアの対応点を3次元復元して検証用の画像面上に逆投影し、その近傍に同輝度、同方向の境界線がない場合は誤対応候補として取り除く。

なお、この対応候補探索については文献 20) に詳しく述べられている。

3.2 ペアの連結

ペアの連結性のチェックにおいては、左画像の境界線に基づいた処理を行う。同じ l を持つペアどうし (Step1), 連続する l を持つペアどうし (Step2), そして「ひげ」を介して連続する l を持つペアどうし (Step3) の3つの組合せを考える。ペアの連結性は、上記3条件下では l に関して連結性は保証されているので、被対応探索画像である右画像におけるセグメント r どうしの連結を意味する。これらの連結性を近距離性、同輝度性、同角度性の3要素で評価する。

3.2.1 Step1: 同じ l を持つペアの連結性 (図6)

図5はB-Repの一例で、 $[l_1, r_1]$ と $[l_1, r_2]$, $[l_2, r_5]$ と $[l_2, r_6]$ などがこの処理の対象となるペアの組合せであり、ペアの l が同一の場合の処理である。連結性評価の条件は以下のとおりである。

距離 ペア1の対応区間の終点とペア2の始点間距離がしきい値以下である。

輝度 r_1 と r_2 の輝度の差がしきい値以下であり、 l と $r_{1,2}$ との輝度の差もしきい値以下である。

角度 左セグメントはなめらかに連続する点列なので、右セグメントも同様であるべきことから、図6の l の4点の○と r の4点の●との間でアフィン変換が成立する。

をすべて満たす場合、ペア1とペア2は連結していると見なす。

3.2.2 Step2: 連続する l を持つペアの連結性 (図7)

Step2では図5の $[l_1, r_2]$ と $[l_2, r_5]$, $[l_2, r_4]$ と $[l_3, r_4]$ などにあたり、連結性評価の条件は以下のと

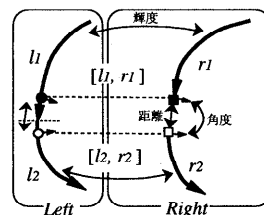


図7 連結性チェック (Step2)

Fig. 7 Check the connectivity of segments (Step2).

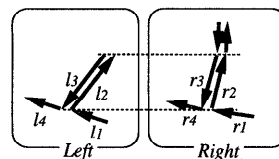


図8 連結性チェック (Step3)

Fig. 8 Check the connectivity of segments (Step3).

おりである。

距離 ペア1の対応区間の終点とペア2の始点間距離がしきい値以下である (Step1と同じ)。

輝度 l_1 と r_1 との輝度の差, l_2 と r_2 との輝度の差がしきい値以下である。

角度 図7の l_1 の終点●と l_2 の始点○での法線方向の差, r_1 の終点■と r_2 の始点□での法線方向の差をそれぞれ求め、その差がしきい値以下である。をすべて満たす場合、ペア1とペア2は連結していると見なす。

3.2.3 Step3: 「ひげ」を介したペアの連結性 (図8)

図5の $[l_3, r_4]$ と $[l_6, r_4]$ が Step3で連結性評価される対象である。

「ひげ」は、図5における l_4 , l_5 にあたるもので、同じ境界線上に属し、かつ表裏の関係にあるセグメントを意味する。エッジ検出処理でこのような「ひげ」が生じた場合、Step2のみの評価では連結性が途切れる。そこで、「ひげ」の部分を飛ばして連続する l を持つペアどうしの連結性を Step2と同条件で調べる。

図8の例においては、 $[l_1, r_1] \rightarrow [l_4, r_2]$ がこのチェックで追加される。

3.3 対応パス探索²¹⁾

以上の処理で、左右セグメント間の輝度・形状の類似度を反映した S_{pair} を節点とし、ペア間の連結を辺とする有向グラフ (図9(a)) が得られる。

この段階での S_{pair} はセグメント間のみの局所的な類似度を表すものであり、より信頼性の高い対応を得るためにはさらに大局的な評価が必要である。そこで、左画像中の各境界線を基にした処理を行い、 S_{pair} を再計算する。

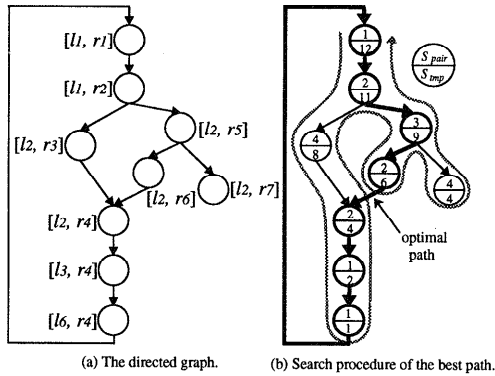


図9 対応パス探索

Fig. 9 Search for the correspondence path.

左画像中の個々の境界線ごとに図9(a)のような有向グラフの中から、以下の式で表されるパスの類似度 S_{path} を最大にするパスを探索する (図9(b)). この例では (b) の太線が選ばれたパスである.

$$S_{path} = \sum_{i \in path} S_{pair}(i)$$

S_{path} を最大にするパス上のペアを正しい対応として、このパスを構成する各ペアの S_{pair} に S_{path} の値を代入する. 最適候補ペアは、この探索により左画像中の境界線を基にした大局的な評価を反映した類似度を持つ.

なお、この対応パス探索については文献 21) に詳しく述べられている.

3.4 対応評価

これまでの処理ではペア $[l, r]$ の類似度を求めただけであり、まだ誤対応が存在し、また各 l に対して対応区間が重複した r が対応している状態、つまり多重対応も存在する. そこで、類似度を利用して誤対応や多重対応などの除去をすることで、左右のセグメントの対応が 1:1 になる処理を行う必要がある (図 10).

まず、ペアの対応が弱いものは弱対応と見なし、対応リストから外す.

$$[l, r] = \begin{cases} \text{採用: } S_{pair} > S_{Tw}, & S_{Tw}: \text{しきい値} \\ \text{除外: } \text{otherwise.} \end{cases}$$

次に、裏セグメントで良い対応が得られている場合、すなわち、ペア $[l, r]$ の l, r の裏セグメント l', r' で構成される裏の対応 $[l', r']$ が存在し、かつ、その類似度が対象ペアの類似度より大きい場合は裏の値を代入する.

$$S_{pair} = \begin{cases} S_{pair} : S_{pair} > S'_{pair} \\ S'_{pair} : \text{otherwise} \end{cases}$$

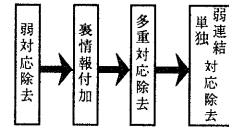


図10 対応評価処理手順

Fig. 10 Flow chart of evaluation for correspondence.

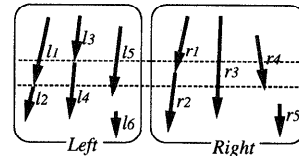


図11 対応評価例

Fig. 11 An example of correspondence evaluation.

この前処理を行った後、 S_{pair} を基に、左右のセグメントで区間の重なりが生じないように多重対応除去を行う.

$$[l, r] = \begin{cases} \text{採用: } \text{対応区間の重ならないペア} \\ \text{採用: } \text{対応区間の重なるが、} \\ \quad S_{pair} \text{ が最大値のペア} \\ \text{除外: } \text{otherwise} \end{cases}$$

多重対応除去処理を図 11 の具体例を用いて説明する.

(a) 図 11 の例で得られたペアリスト.

l_1 : r_1, r_2, r_3

l_2 : r_2, r_3

l_3 : r_1, r_3

l_4 : r_1, r_2, r_3

l_5 : r_4

l_6 : r_2, r_5

(b) 各 l において、そのセグメントを含むペア $[l, r]$ を類似度 S_{pair} の値を基にソートする.

l_1 : $r_1 = r_2 > r_3$

l_2 : $r_2 > r_3$

l_3 : $r_3 > r_1$

l_4 : $r_3 > r_1 = r_2$

l_5 : r_4

l_6 : $r_5 > r_2$

$l : r_i = r_j$

$\rightarrow S_{[l, r_i]} = S_{[l, r_j]}$

$l : r_i > r_j$

$\rightarrow S_{[l, r_i]} > S_{[l, r_j]}$

(c) 昇順で区間の重なりが生じないペアを選ぶ.

l_1 : r_1, r_2

l_2 : r_2

l_3 : r_3

l_4 : r_3

l_5 : r_4

l_6 : r_5

- (d) r に関する逆引きリストを作り, S_{pair} を基にソートする.

$r_1 : l_1 > l_3 = l_4$
 $r_2 : l_1 = l_2 > l_4 > l_6$
 $r_3 : l_3 = l_4 > l_1 = l_2 \quad S_{[l,r]} = S_{[r,l]}$
 $r_4 : l_5$
 $r_5 : l_6$

- (e) (c) と同様に区間重複除去を行う.

$r_1 : l_1$
 $r_2 : l_1, l_2, l_6$
 $r_3 : l_3, l_4$
 $r_4 : l_5$
 $r_5 : l_6$

- (f) (e) を l に関するリストに戻す.

$l_1 : r_1, r_2$
 $l_2 : r_2$
 $l_3 : r_3$
 $l_4 : r_3$
 $l_5 : r_4$
 $l_6 : r_2, r_5$

- (g) (c) と (f) で求めたリストを比べ, 対応区間重複が生じるペアがあれば, S_{pair} の値を基に削除する.

$l_1 : r_1, r_2$
 $l_2 : r_2$
 $l_3 : r_3$
 $l_4 : r_3$
 $l_5 : r_4$
 $l_6 : r_5$

(この例では l_6 に関して不整合が起きているので, $S_{[l_6, r_2]} < S_{[l_6, r_5]}$ であることから, $[l_6, r_2]$ が削除される.)

以上の処理で, 左右両セグメントに関して多重対応区間を除去することができる. また, この処理によって選ばれなかったペアでリストを作り, 上記の処理を繰り返し行うことにより, S_{pair} は第2位以下であったが, 実際は正しい対応のペアを選ぶ処理も行う.

この段階で対応区間の重複問題は解消されるが, 対応の妥当性をセグメント形状のなめらかさで判断する処理を行う. 各左セグメントに対応する右セグメント数が2つ以上の場合, 図6における連結性チェックの角度条件と同じようにしてなめらかさを調べる. つまり, 左セグメントはなめらかな形状のセグメントであり, 対応する右セグメント群も同様になめらかでなければならない. この条件を満たすならば, 左右セグメントにおける対応区間の始点, 終点で構成される点群間でアフィン変換が成立する.

$$[l, r] = \begin{cases} \text{採用:} & \text{アフィン変換成立} \\ \text{除外:} & \text{otherwise} \\ & (S_{pair} \text{ が低い方}) \end{cases}$$

そして, 最後の処理として連結性のチェックを行う. 残っているペア間で, もう一度連結性を調べ, 連結性がない, もしくは連結性が薄いペアを偶然に条件を満たし, 信頼性が低い対応と見なして対応リストから除く処理を行う.

$$[l, r] = \begin{cases} \text{除外:} & \text{単独対応} \\ \text{除外:} & \text{弱連結 (他の1つだけのペアと} \\ & \text{連結かつ } S_{pair} < S_{Tc}), \\ & S_{Tc}: \text{しきい値} \\ \text{採用:} & \text{otherwise} \end{cases}$$

3.5 対応評価の統合

以上は左画像を基準画像としてその境界線を基に処理を行ったが, オクルージョンやエッジ検出失敗などによって境界線の形状が意味のない形になることもある. そこで, 図12に示すように図4のうち連結性チェック, 対応パス探索, 対応評価の処理を右画像の境界線に基づく処理も行い, その結果を統合することにより正確な対応評価をする.

統合においては, それぞれの処理で得られた対応関係が同一でない場合, S_{pair} の値が大きいものを優先し, 小さいものは誤対応として除外する.

$$[l, r] = \begin{cases} \text{採用 } [l, r_1]: & S_{[l, r_1]} > S_{[r_2, l]} \\ \text{採用 } [r_2, l]: & S_{[l, r_1]} < S_{[r_2, l]} \\ \text{除外:} & \text{otherwise} \end{cases}$$

3.6 3次元復元

求められた対応関係から3次元復元を行い, 3D B-Repを求める. 3D B-Repは左画像の2D B-Repに (x, y, z) の3次元座標値のスロットを付け加えたもので, 基本的には対応関係が求めた左画像の各セグメントについて点単位で復元を行うが, エピポーラ線と平行な水平セグメントに関しては特別な処理を行う.

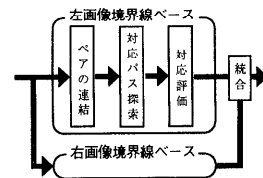


図12 対応評価の統合

Fig. 12 Integration of correspondence evaluation.

3.6.1 水平セグメントでない場合

対応点の標準カメラモデル座標 (図2) を (X_L, Y_L) , (X_R, Y_R) とすれば,

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \frac{2a}{X_L - X_R} \begin{pmatrix} \frac{X_L + X_R}{2} \\ Y_L \\ 1 \end{pmatrix}$$

$2a$ = 左右の焦点中心間距離

(x_c, y_c, z_c) : カメラ座標系での3次元座標

となり, 3次元座標を計算できる. しかし, l における各点○と Y 値が完全に一致する r の点があることは稀である. そこで, セグメントにおける Y 値は単調増加 (減少) が保証されているので, Y_L を挟み込む連続する2点●を探し, それを結んだ直線との交点 $\times$ を (X_R, Y_R) として (x, y, z) を計算する (図13).

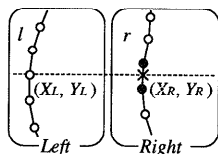


図13 3次元復元

Fig. 13 3D reconstruction.

3.6.2 水平セグメントの場合

エピソード線と平行な水平セグメントのペアに関しては, 対応するセグメントの点は $Y_L \cong Y_R$ であるから, 相手側のどの点にも対応するといえるので, 以下の処理を行う.

2 眼の場合 水平部分の補間については, 情報が不十分であるとして補間しない. または, 両側にそれぞれ連結するペアがある場合のみ, 端点どうしを直線で結び補間する.

3 眼以上の場合 水平セグメントにならない他の視点からの画像と組み合わせ, 図4と同様な処理で3次元復元を行い, その結果を使用する.

4. 実験結果

3章で示した処理手順でいくつかのシーンに対して3次元構造を復元した実験結果を以下に示す.

実験1として, 本手法がオクルージョン問題に対して頑健性を有することを簡単な例を用いて示す (図14). (a) のように同色の対象物が配置されたシーンを考え, 実際のシーンで行った. 3台のカメラを用い, 中間のカメラを2台のカメラ間の上に設置し, 同じ大きさの長方形の白紙を垂直に立てて観測した3眼のデータが (b) である. 画像は 640×480 pixel, 256 階調

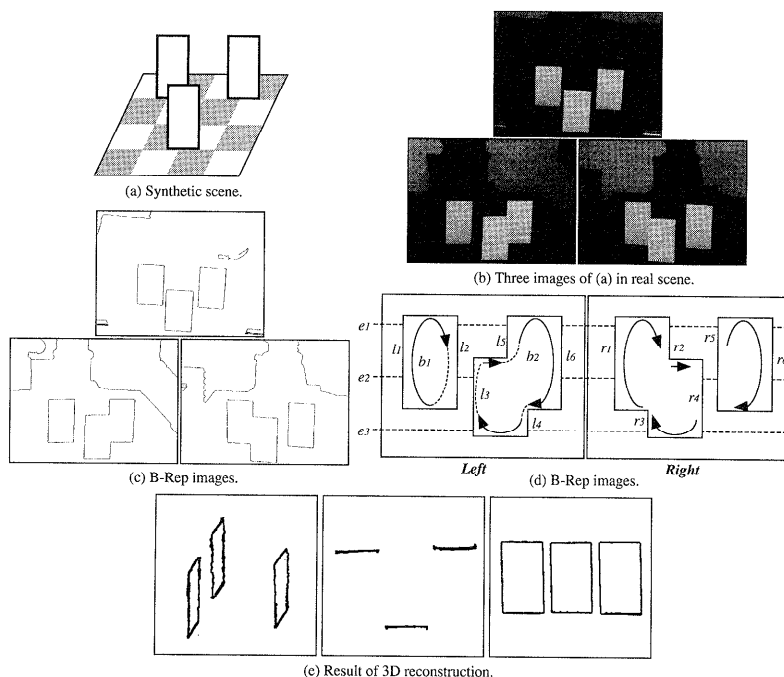


図14 実験結果1

Fig. 14 Results of experiment 1.

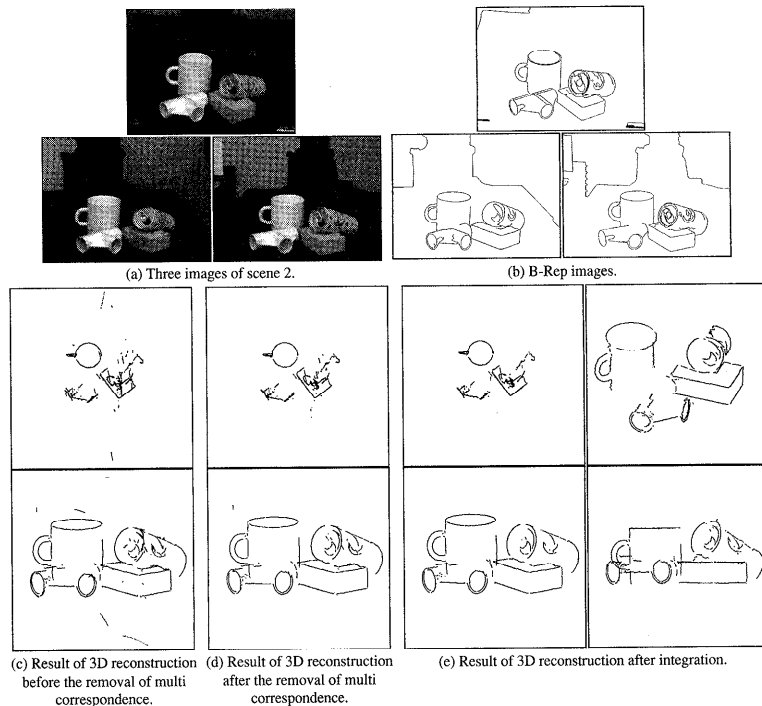


図 15 実験結果 2

Fig. 15 Results of experiment 2.

のグレイ画像で、これに対して Sobel オペレータで微分し、細線化、延長処理、エッジを抽出、小領域除去を行って境界線を抽出し、2D B-Rep 構造に変換したものが (c) である。このようにオクルージョンが生じるシーンで得られるステレオ画像は、対象物が同色であるため境界線の一部が検出されない可能性があり、(c) のようになる場合が多い。この場合における対応関係を示した図が (d) である。(d) の状況では、局所的な特徴量のみで対応関係を求めた場合、エッジポラ線 $e_1 \sim e_3$ において、 e_1 , e_3 ではセグメントの並びに問題はないが、 e_2 においてはオクルージョンが生じているため、垂直方向のセグメントの並び順は $(l_1, l_2, l_3, l_6) : (r_1, r_4, r_5, r_6)$ となり、 $l_2 : r_4$, $l_3 : r_5$ と間違っただ対応関係が求まる可能性がある。

しかしながら、本手法では左画像の境界線 b_1 , b_2 それぞれに対して連結性を考慮しているため、対応する境界線部分を正しく求めることができる ((d) 左画像の境界線の黒線：対応あり、点線：対応なし、右画像の境界線の黒線：対応部)。本手法でも $l_2 : r_4$ も対応候補としては残るが、対応評価におけるセグメントのなめらかさのチェックで、 l_2 に対して (r_2, r_4) の組合せは成立せず、類似度 S_{pair} の比較により $l_2 : r_4$ は誤対応として除かれる。 $l_3 : r_5$ も同様にして誤対応として削除される。本手法により復元された結果が (e)

であり、それぞれ左上部、上面、正面から見た 3D 画像である。このようにオクルージョンにより生じる並び順の変化に対して頑健で正しい対応結果を求めることができる。

図 15 はコップや空缶、パイプなどが置かれたシーンを撮影した 3 眼のデータである (a)。B-Rep 画像は (b) であり、セグメントのペアを求め、左画像の境界線を基に類似度を計算し、多重対応除去前までの処理で 3 次元を復元した結果が (c) である。この段階では誤対応が多く、十分な復元であるとはいえない。(d) は多重対応のみを除去したものである。大きな誤対応部分は減少しているが、まだ空缶やパイプの一部分の対応関係に誤りが見られる。そして (e) は (d) に対して単独対応除去などの対応評価処理を行った結果と、(b) の右画像の境界線に基づいて同様な対応評価を行った結果を統合したものを異なる 4 つの視点から見た図であり、(c), (d) で見られた誤対応がほぼなくなっている。

図 16 は水平に置かれた 3 台のカメラで撮影したおもちゃのガソリンスタンドである (a)。左右画像の 2D B-Rep は (b) であり、セグメント数はそれぞれ 939, 750 である。左右の 2 眼のみでの 3 次元復元結果をそれぞれ斜め上、上面、正面からの視点で射影したものが (c)、中間の画像を対応候補探索時に検証用として

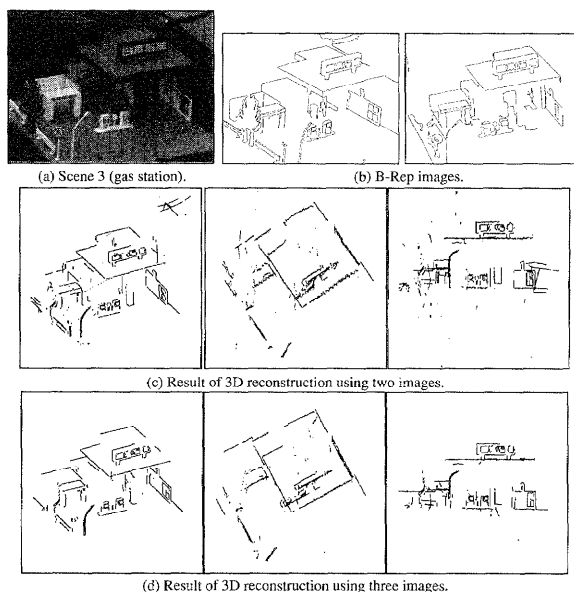


図 16 実験結果 3

Fig. 16 Results of experiment 3.

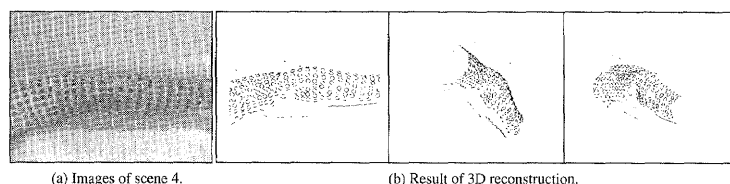


図 17 実験結果 4

Fig. 17 Results of experiment 4.

用いた結果が (d) である。(c) と (d) の 3 次元復元を比較すると、当然ではあるが、木の部分の誤対応などがかなり減少している。(d) における対応ペア数は 408 個であり、うち誤対応は 11 ペア、誤対応率は 2.7% であった。誤対応の大半は木の部分などの微小セグメントの連続している部分であり、主要な構造はこのように複雑なシーンでも十分に復元されている。処理時間 (Sun Ultra1 Model 170: UltraSPARC-I, 167 MHz, SPECint [252.0], SPEC fp [351.0] 使用) に関しては、(c) 16.5 秒 (2D B-Rep 生成: 6.8 秒), (d) 12.6 秒 (2D B-Rep 生成: 8.8 秒) であり、対応探索時に検証する処理などが加わるにもかかわらず、対応探索区間が小さくなるので、全体の処理時間は (d) の方が少なくなっており、多眼視の有効性が示されている。

図 17 は人間の腕のモデルを生成するために計測した結果である。腕に円形のシールを貼り撮影した (a)。復元結果を 3 視点 (正面, 左斜下, 右側面) から見たものが (b) である。このような同じ形が連続する場合では、エッジ条件、輝度の判断だけでは難しいが、

本手法の境界線の形状という制約条件を付加することにより、安定に対応関係を求めることができる。

復元精度に関しては、実寸の分かっている物体を観測して復元し、比較を行った。復元精度は 1mm 前後であった。実験はアクティブステレオカメラシステム²²⁾を用いて、解像度が 640×480 pixel, 焦点距離が 32mm の CCD カメラを使用し、計測時の左右のカメラ間距離は約 600 mm, 対象物までの距離は約 1.6 m として行った。この環境下では、1 pixel のずれは約 1mm の誤差に相当し、計測結果で得られた結果は理論値にほぼ一致するものである。

また、3 章で用いたしきい値は画像のサイズ、輝度レベルなどからほぼ決定され、今回の実験においては以下のように定めた。

3.1 節 I_{thr} : 10.0

3.2 節 距離: 4.0, 輝度: 20.0, 角度: 30.0°

3.4 節 S_{Tw} : 5.0, S_{Tc} : 10.0

これらの条件を多少変更しても、復元結果に大幅な影

響を与えることはないが、距離の条件を大幅に緩めると、誤対応が多くなり、全体の復元率は悪くなる傾向がある。

5. む す び

ステレオ画像間の対応探索において、領域の境界を構成する境界線セグメントの連結性に基づいて対応を評価し、3次元復元を行う方法について述べた。2D B-Rep化されたデータをエピソード条件、輝度などから対応候補を求め、左右のセグメントからなるペアを定義し、ペアどうしの連結性を近距離性、同輝度性、同角度性によって評価した。境界線に基づいて連結するペアによって構成される最適パスを求め、その類似度を評価基準として誤対応・多重対応除去を行い、左右のセグメント間の対応関係を求め、3次元復元を行った。本手法は対応基準として境界線の類似性に基づく探索であるため、大局的な評価が可能となり、安定した復元を行うことができた。

実験として様々な物体、シーンを3台のカメラで撮影した画像を用い、本手法で3次元復元を行った。復元結果は十分な精度を持つ幾何情報を有しているので、物体認識^{13),14)}、トラッキング¹⁶⁾などに直接利用できる。また、多眼視画像では、対応候補を絞り込む前処理を行うことで対応探索空間を狭められるので、結果的には全体の処理時間の短縮につながる。また、2眼画像では難しい水平セグメント部の復元が容易になる。しかし、実験結果3で示したように2眼画像のみの場合でも、多少誤対応のノイズが存在するが、主要な構造に関しては十分な復元結果を得ることができる。

本論文では、連結性チェックに関しては、ペア間が近距離である場合のみに限って行った。そのため、実際は1つのセグメントだが、オクルージョンなどによりそのセグメントが分割されている場合には対応関係の不一致が起こる可能性がある。この解決策として、対応関係のチェックを強化し、距離が離れたペアでも滑らかにつながると見なせるセグメント対ならば、連結していると見なして類似性を評価する必要がある。また、対応評価においては、誤対応がまだ若干残っている。この誤対応の主な原因は短いセグメントの連結部分であり、類似度の近似した最終候補が多数残っているためである。この原因を詳しく解析して、改善しなければならない。そして、本手法は境界線に基づく手法であるため、線分が密集するようなテクスチャ部分に対しては誤対応を起こす可能性が高い。しかし、テクスチャ部分を1つの領域として扱い、領域の境界線のみを本手法の対象とすることで対応可能である。

そして、テクスチャ内部の対応に関しては、得られた境界線の対応情報を用いて相関法で求める。今後は境界線部分の3次元復元だけではなく、領域内の特徴を用いて面復元などを行うモジュールを追加し、領域情報も有する拡張3D B-Repの生成を行う。また、現段階での対応関係探索処理においては、しきい値の多くは経験則に基づいて決められているが、自動設定、またはその数を減らす方向で改良を加える予定である。

謝辞 日頃有益な助言と討論をいただく、電子技術総合研究所コンピュータビジョングループの各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松山隆司, 久野義徳, 井宮 淳 (編): コンピュータビジョン技術評論と将来展望, pp.123-137 (1998).
- 2) Marr, D.: *Vision*, Freeman (1982).
- 3) Grimson, W.E.L.: Computational experiments with a feature based stereo algorithm, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.7, No.1, pp.17-34 (1985).
- 4) Ohta, Y. and Kanade, T.: Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.7, No.2, pp.1074-1082 (1985).
- 5) Baker, H.H. and Binford, T.O.: Depth from edge and intensity based stereo, *Proc. IJCAI81*, pp.631-636 (1981).
- 6) Medioni, G.G. and Nevatia, R.: Segment-based stereo matching, *Computer Vision, Graphics, Image Processing*, Vol.31, No.1, pp.2-18 (1985).
- 7) Ayache, N. and Faverjon, D.: Efficient registration of stereo images by matching graph descriptions of edge segments, *Int. J. Computer Vision*, Vol.1, No.2, pp.107-131 (1987).
- 8) Horaud, R. and Skordas, T.: Stereo correspondence through feature grouping and maximal cliques, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.11, No.11, pp.1168-1180 (1989).
- 9) Faugeras, O.: *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, MIT Press (1993).
- 10) 嶋崎真一, 金子俊一, 本多庸悟: Simulated Annealingによるステレオ対応付けにおける隠れ部分の評価について, 情報処理学会研究会資料, CV93-6 (1995).
- 11) 加藤顕剛: 1秒で物体の位置と姿勢が認識できる眼がほしい, ロボット学誌, Vol.12, No.1, pp.15-16 (1994).
- 12) 富田文明, 吉見 隆, 植芝俊夫, 河井良浩, 角保志, 松下俊夫, 市村直幸, 杉本和英, 石山 豊:

3次元視覚システム VVV 研究開発—概要, 情報処理学会研究会資料, CVIM109-1 (1998).

- 13) 角 保志, 富田文明: ステレオビジョンによる3次元物体の認識, 信学論, Vol.J80-D-II, No.5, pp.1105-1112 (1997).
- 14) 角 保志, 河井良浩, 吉見 隆, 富田文明: セグメントベースステレオによる自由曲面体の認識, 信学論, Vol.J81-D-II, No.2, pp.285-292 (1998).
- 15) 石山 豊, 角 保志, 富田文明: ステレオ視による位置姿勢の変化する3次元物体の追跡, 情報処理学会研究会資料, CV95-3 (1995).
- 16) 松下俊夫, 角 保志, 富田文明, 石山 豊: ビジュアルトラッキングを用いたハンドリング作業状況の認識, 第15回日本ロボット学会学術講演会, pp.985-986 (1996).
- 17) 河井良浩, 富田文明: 視覚障害者用3次元物体認識支援システム—対話型3次元触覚ディスプレイシステム, 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.6, pp.870-877 (1997).
- 18) 杉本和英, 富田文明: 輪郭線の屈曲点, 変曲点, 遷移点の検出, *MIRU '94*, Vol.I, pp.83-90 (1994).
- 19) 角 保志, 石山 豊, 植芝俊夫, 河井良浩, 杉本和英, 富田文明: 画像の境界表現のデータ構造とインタフェース, 第49回情報処理学会全国大会論文集, Vol.2, pp.123-124 (1994).
- 20) 石山 豊, 角 保志, 河井良浩, 植芝俊夫, 富田文明: セグメントベースステレオにおける対応候補探索, 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.5, pp.723-728 (1998).
- 21) Ueshiba, T., Kawai, Y., Ishiyama, Y., Sumi, Y. and Tomita, F.: An Efficient Matching Algorithm for Segment-Based Stereo Vision Using Dynamic Programming Technique, *Proc. MVA '98*, pp.61-64 (1998).
- 22) 河井良浩, 石山 豊, 植芝俊夫, 角 保志, 高橋裕信, 富田文明: ステレオカメラシステム—パタパタ, *MIRU '94*, Vol.II, pp.127-134 (1994).

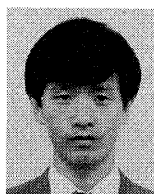
(平成10年12月25日受付)

(平成11年6月3日採録)



河井 良浩 (正会員)

1964年生。1989年名古屋大学大学院博士課程前期課程情報工学専攻修了。同年電子技術総合研究所入所。現在, 知能システム部主任研究官。コンピュータビジョン, 視覚障害者用福祉機器開発の研究に従事。



植芝 俊夫 (正会員)

1961年生。1986年東京大学大学院博士課程前期課程情報工学専攻修了。同年電子技術総合研究所入所。1997~1998年カナダNRC客員研究員。現在, 知能システム部主任研究官。コンピュータビジョン, 特に3次元情報の再構築の研究に従事。



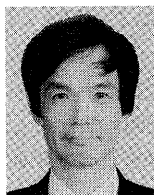
石山 豊

1962年生。1984年武蔵工業大学工学部電気工学科卒業。同年スタンレー電気(株)入社。以来, 技術研究所勤務。画像処理システム, コンピュータビジョンの研究に従事。



角 保志 (正会員)

1965年生。1993年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年電子技術総合研究所入所。現在, 知能システム部主任研究官。コンピュータビジョンの研究に従事。工学博士。



富田 文明 (正会員)

1950年生。1978年大阪大学大学院博士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。1983~1984年米国カーネギーメロン大学客員研究員。現在, 知能システム部主任研究官。コンピュータビジョン, 知能ロボットの研究に従事。工学博士。