

## ステレオ画像のB-REP対応による3次元シーンの記述

## Scene Description Based on Matching B-REPs of Stereo Images

高橋裕信

Hironobu TAKAHASHI

富田文明

Fumiaki TOMITA

三洋電機筑波研究所

Tsukuba Res. Cen. SANYO Ltd.

電子技術総合研究所

Electrotechnical Laboratory

Abstract: Region-boundary-segments in a two-dimensional B-REP of an image are used as units for correspondence between a pair of stereo images. Since a B-REP of an image reduces the amount of data in the image a search space for correspondence is small. Since a segment has much more information than a point unit the reliable correspondence is easily obtained. Also, since the output form is a three-dimensional B-REP of a scene, it can be directly used for an input to an object recognition system without any preprocessing

### 1. まえがき

ステレオ(両眼視)は、シーンの距離情報を三角測量の原理で得る基本的な方法であり、その簡便さから将来のロボットの眼としてこれから最も利用される方法であろう。しかし、光投影レンジファインダにとってかわるほどには、物体の認識に利用できる方法がまだ提案されていないのが現状である。その理由としては、ステレオ画像間で対応点を求める本来の問題に加えて、精度および出力形式の問題もある。画像のB-REP(Boundary REPresentation)から得られる領域の境界線セグメントを対応の単位として利用する方法<sup>[1]</sup>は、従来から行なわれている点単位の対応法<sup>[2, 3]</sup>に比べて、個々のセグメントが持つ情報量が増大し、かつ画像全体の情報量は大幅に圧縮されるため、対応の探索空間が小さく、信頼性の高い対応を容易に得ることができる。また、その出力形式がそのまま認識に利用できる3次元B-REPになっている利点もある。本報告では、左右のセグメントの対応が

不完全な場合でも、セグメントの位置及び接続関係を評価する関数を用いて対応を求める方法とその実験結果について述べる。

### 2 画像のB-REP

ステレオ画像のB-REPを得るための基本処理とその他の必要な処理について述べる。詳細は文献[4]にあるので、ここではその概略を述べる。

①まず、1次微分オペレータにより画像の各点についてエッジの強さと方向を求め、エッジの細線化—しきい値—延長処理により、領域を囲む閉じたエッジを得る。

②次に、領域が右側にあるようにエッジを追跡し、領域の境界線を求める。この境界線を分岐点で分割した後、さらに曲率が一定値以上で局所的に極大あるいは極小である屈曲点で分割する。

③ 分割されたセグメントに対して直線または2次曲線をあてはめる。あてはめの誤差が大きい場合は、セグメントの両端点を結ぶ直線から最も離れた点で、そのセグメントをさらに細かく分割する。分割されたセグメントに対して再び直線または2次曲線をあてはめる。以上の処理は、あてはめの誤差が一定値以下になるまで繰り返される。

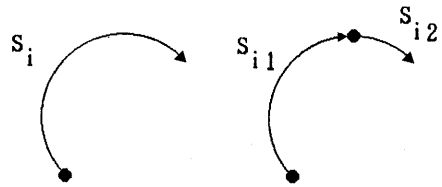


図1.  $y' = 0$  でのセグメントの分割

以上の基本処理に加えて、次のようにステレオ画像の対応に必要な処理がある。

④ 2次曲線によって近似されたセグメントが、図1のように $y'=0$ となる極大点あるいは極小点を持つ場合は、さらにその点で分割する。その結果、セグメントは $y$ の一価関数 $x=g(y)$ によって表現することができる。

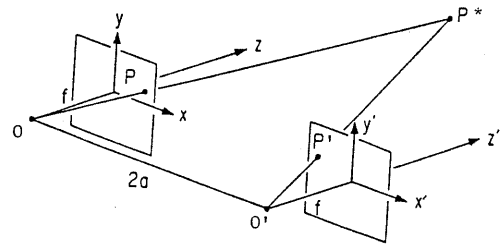


図4. 標準カメラモデル

その結果、例えば図2(a)のステレオ画像から図2(b)の境界線表現を得ることができる。また、次のように対応の役に立つ仮想線を求める処理がある。

⑤ 連結していない2つの直線セグメントに直線をあてはめた場合に、そのエラーが小さい場合にはその間に仮想直線を引く。同様に、曲線から仮想線を引く場合には、2つの曲線セグメントに曲線をあてはめた場合に、そのエラーが小さい場合がある。例えば、図2の画像では図3の仮想セグメントが得られる。

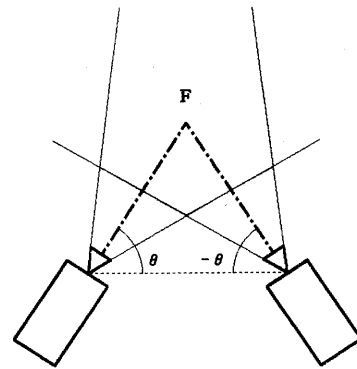


図5. 輻輳カメラ

### 3 カメラの構成

#### 3.1 標準カメラモデル

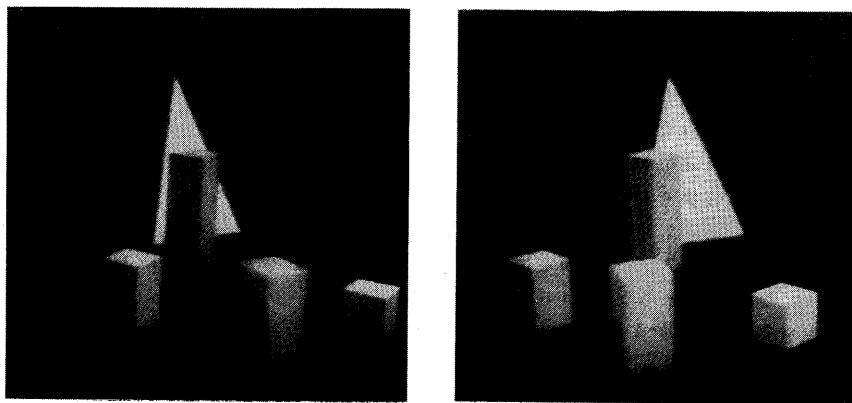
標準ステレオカメラモデルとして、図4のように、2台のカメラレンズの中心 $O$ と $O'$ を結ぶ基線の長さを $2a$ 、カメラレンズの焦点距離を $f=1$ とし、左右の画像平面が基線に平行にレンズの中心から $f$ の距離にあるカメラモデルを考える。いま、3次元空間内の点 $P^*(x, y, z)$ の左右画像における像を $P(x_p, y_p)$ 、 $P'(x'_p, y'_p)$ とすると、視差 $d=x_p-x'_p$ から点 $P^*$ の距離 $z$ は次式によって得られる。

$$z = \frac{2af}{d}$$

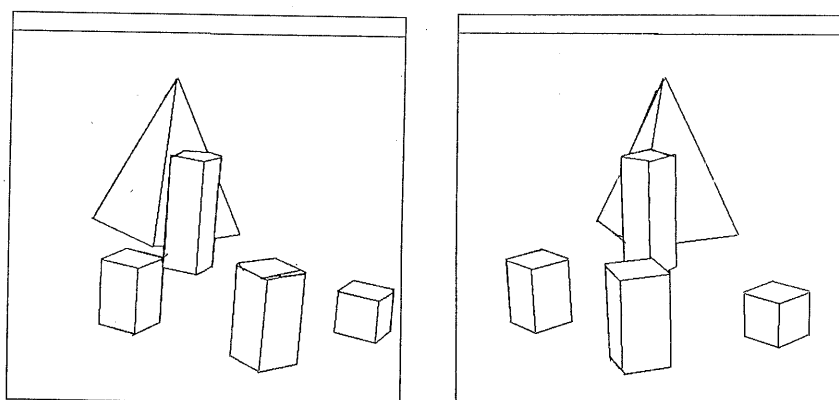
問題は、左右の画像で対応点を求めることである。幾何学的な拘束として

$$\begin{aligned} x'_p &> x_p \\ y'_p &= y_p \end{aligned}$$

であることから、左の画像上の点に対応する右の画像上の点を同じ水平走査線の半直線（エピポラ線）上に類似点を求めることになる。逆も同様である。以下、これを“エピポラ条件”と呼ぶ。



( a ) ステレオ画像



( b ) 境界線表現

図 2 . セグメントの抽出

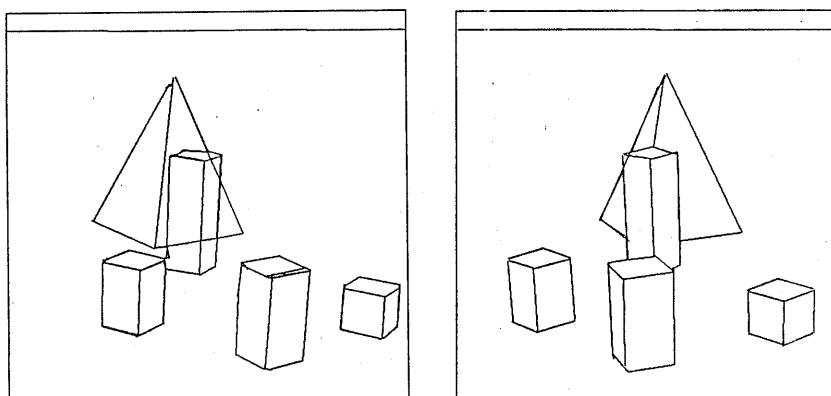


図 3 . 仮想セグメント

### 3.2 輻射カメラ

実際の2台のカメラの構成は、図5のように、カメラの輻射運動により注視点Fの距離を変えることができる。これにより、基線を長くすることができ、距離測定の精度を高めることができる。しかし、この場合にはエピポーラ線は水平な直線ではなくなる。そこで、カメラの輻射角に基づいて、画像の境界線表現を標準カメラモデルの表現に変換する処理が行なわれる。カメラの輻射角が $\theta$ の場合、輻射カメラの画像上の1点の座標 $(x, y)$ は次式によって標準カメラの画像上の座標 $(x', y')$ へ変換される(付録1参照)。

$$x' = \frac{\sin \theta + x \cos \theta}{\cos \theta - x \sin \theta}$$

$$y' = \frac{y}{\cos \theta - x \sin \theta}$$

その結果、図3の境界線表現から図6の境界線表現を得る。

以上の処理の結果、画像は領域の集合によって表現され、各領域はその境界線のセグメントのリストによって表現される。領域は、それを囲む外接長方形と明るさをその値に持つ。セグメントは、始点と終点の座標、および直線または曲線の方程式をその値に持つ。以上の記述を左右のステレオ画像に対して行ない、以下の対応処理はこの記述のデータ構造上で行なわれる。

### 4. 対応探索

基本的には左右の画像で対応する領域やセグメントを求めるのであるが、同じ対象物を表わす領域やセグメントでも、照明条件、オクルージョン、ノイズなどの影響により、左右の画像で必ずしも同じようには得られない。そこで、3次元の構造をも考慮したパターン照合法によりこの問題を解決している。

#### 4.1 領域の対応

まず、領域単位で粗くその対応を求める。左右の画像の一对の領域が対応する必要条件是、

- ① 領域の明るさの差が一定値以内であり、
- ② 領域内にエピポーラ条件を満足する点が存在することである。

したがって、図7のように、1つの領域が多数の領域に対応する場合がある。これは、その境界線のセグメントが対応する可能性のある領域の対を求めており、次にセグメント単位で対応を求める場合に、その探索空間を減らす役割を果たしており、一種の粗密解析となっている。②の条件を調べるのに、実際には簡単のために領域の外接長方形の座標を利用している。

#### 4.2 セグメントの対応

相対応する領域の境界線を構成するセグメン

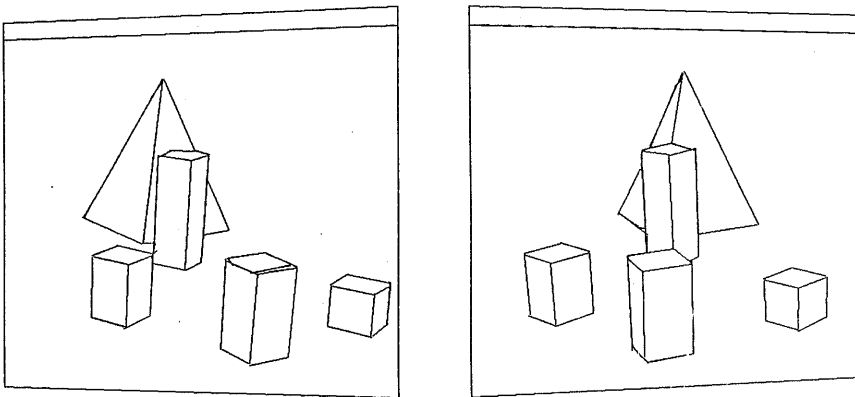


図6. 輻射運動を補正した境界線像

トおよび仮想セグメント間で対応の候補を求め、その対応リストを作成する。一对のセグメントが対応の候補となる条件は、図8のセグメント $S_j$ と $S'_j$ のように、

- ① エピポーラ条件を満足する対応部分(ABとA'B')が存在し、
- ② 対応部分のベクトルの方向の差が一定値以内であることである。

そして、対応の候補となるそれぞれのセグメント対( $S_j, S'_j$ )に対して、その形状の類似度を示す値CとDを計算する。Cはプラスの要因を表わし、対応する部分の弦の短い方の長さ：

$$C(S_j, S'_j) = \min(AB, A'B')$$

で与えられる。Dはマイナスの要因を表わし、始点から終点までの視差のずれ：

$$D(S_j, S'_j) = (x_A - x'_A) - (x_B - x'_B)$$

で与えられる。この段階で求められた対応には、1つのセグメントが同じy軸上で複数のセグメントに対応する“多重対応”も存在する。次の段階で、セグメントの類似度とセグメントの接続関係から偽の対応を除去する。

#### 4.3 セグメントの連続性

左右のそれぞれの画像について、セグメントの連結リストを作成する。2つのセグメントが連結する条件は、

- ① それぞれが属する領域の明るさの差が一定値以内であり、
- ② 一方のセグメントの終点と他方のセグメントの始点の距離が一定値以内であることである。

連続するセグメントは、原則的に、その対応も連続していなければならない。そこで、この連結リストと対応リストを利用して、各セグメントの前後から、連続して対応するセグメントの列であるパスを次のように求める。

① 図9(a)のBとB'のように、対応する2つのパス( $(S_1, \dots), (S'_1, \dots)$ )の両者の端点が丁度対応している場合は、それぞれの端点から接続するセグメントで対応の候補となっているセグメント対( $S_i, S'_i$ )が存在すればそれらをパスに追加する。

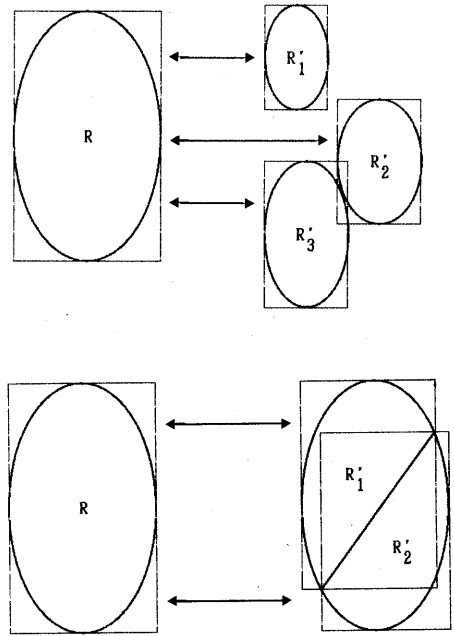


図7. 領域間の対応

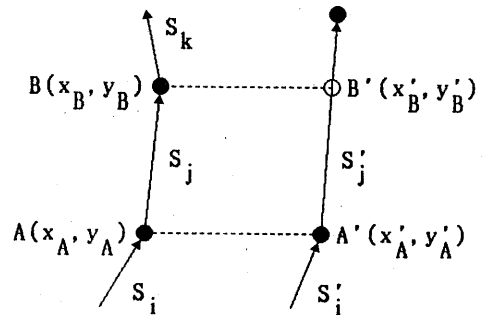


図8. セグメント間の対応

② 図9(b)のBとB'のように、一方の端点が他方の中間点と対応している場合は、 $S'_j$ に接続するセグメントで $S_j$ の対応候補であるセグメント $S'_i$ が存在すればそれをパスに追加する。

また、以上のように直接的には連結していない場合でも、次のように連続性を仮定できる場合がある。

③ 図9(c)のように、1つのセグメントに2つのセグメントが対応している場合、 $A'B'$ を通る直線と $P'$ および $Q'$ との距離を調べ、両方とも小さい場合は、 $A'P'$ と $Q'B'$ の2つのセグメントの代わりに $A'B'$ というセグメントが存在すると仮定する。

④ 図9(d)のように、一方の2つのセグメントは連結しているが、それらに対応する他方の2つのセグメントは連結していない場合、 $B$ を通る水平線と $A'P'$ の延長線および $B'Q'$ の延長線の交点 $B'$ と $B''$ を求める。そして、 $B'B''$ の距離が小さい場合は、 $A'B'$ と $B'C'$ という連結する2つのセグメントが存在すると仮定する。

但し、上記の③と④の処理は、仮のセグメントとの類似度が $C > |D|$ の場合に限る。

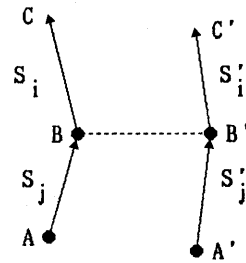
以下同様にして、パスに追加するセグメントがなくなるまで以上の処理を繰り返す。ただし、多重対応が生じる場合はそこで打ち切る。パスは有向グラフとなる。その結果、図10のように、仮のセグメントが新たに付け加えられることになる。

#### 4.4 セグメントのグループ化

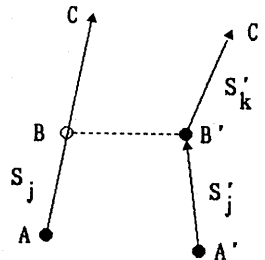
パスを3次元空間上に投影した場合に、同一の平面を構成するセグメントをグループ化する。この平面拘束の検証には、「標準カメラモデルにおいては、平面上の任意の1点の一方のカメラの画像上の座標は、他方のカメラの画像上の座標のアフィン変換となる。」という法則により画像上で行なうことができる(付録2参照)。グループ化の過程は以下の通りである。

① まず、それぞれの連続する2つのセグメントの3つの端点から1つの平面が定まるが、その対応する3対の点に対してアフィン変換行列を求める。

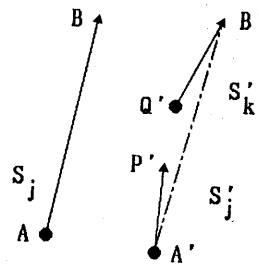
② それぞれのセグメントに連続するセグメントがその平面上に存在するかどうかは、上記の法則により、一方の端点をアフィン変換した点が



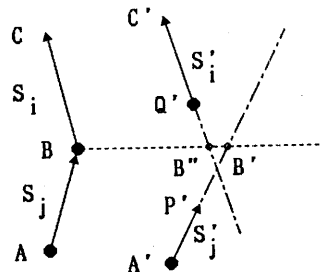
(a) パスの端点が丁度対応している場合



(b) 一つのセグメントに連続する2つのセグメントが対応している場合



(c) 一つのセグメントに連続していない2つのセグメントが対応している場合



(d) 連続する2つのセグメントにそれぞれ別のセグメントが対応している場合

図9. セグメントの連続性

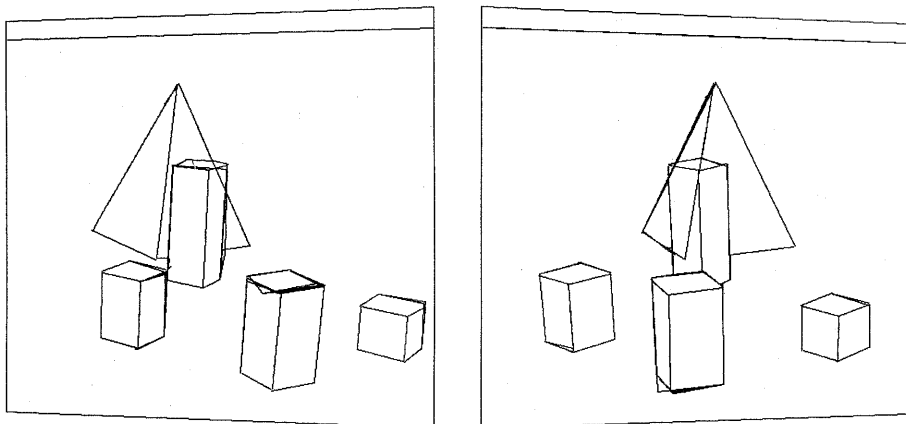


図10. 仮のセグメント

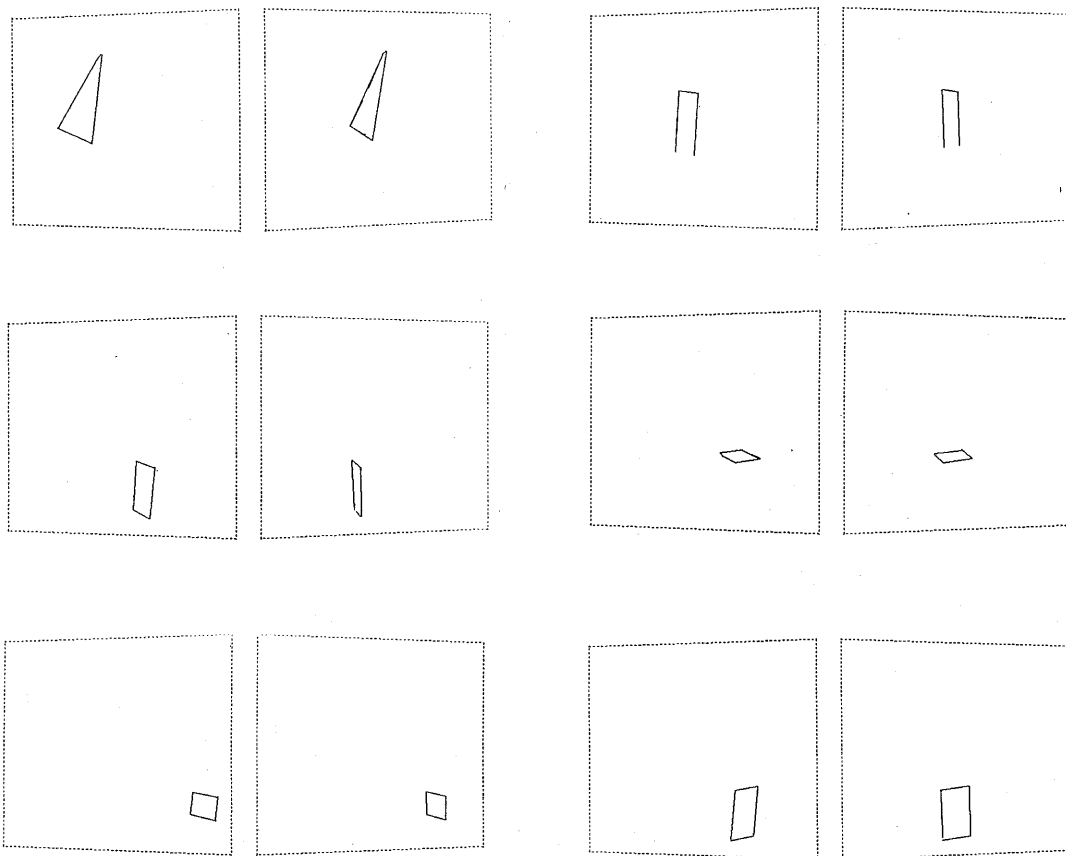


図11. セグメントのグループ

その対応点と一致するかどうかによって検証することができ、その誤差が一定値以内ならば同一平面上とみなす。そして、この平面拘束を満足する場合はさらにその先のセグメントを順次調べていく。その結果、例えば図11のようなセグメントのグループができる。

③以上の処理の結果得られる一対のグループに対して、その形状の類似度を計算する。セグメント対 $(S_j, S'_j)$ のそれぞれを通る一対のグループの類似度 $G$ は、次のように、2つのグループ間で対応の候補となっている各セグメント対 $(S_n, S'_n)$ の類似度の合計で与えられる。

$$G(S_j, S'_j) = \sum C(S_n, S'_n) - p \cdot \sum |D(S_n, S'_n)|$$

但し、 $p$ は視差のずれに対する重み付けである。1つのセグメントが複数のグループに属する場合は、そのセグメントは $G$ の値が最大となるグループに属するものとする。

#### 4.5 多重対応の除去

偽の対応となっているセグメント対は、対応する部分が小さく、始点と終点の間で視差が大きく変化し、また接続するセグメント対も少ないので $G$ の値は小さくなる。従って、1つのセグメントが複数のセグメントに対応している多重対応の場合はいずれかの対応が誤りであると考えられ、 $G$ が最大となる対応を順に選び、他の対応は除去する。例えば、図12のように2対2の多重対応が生じている場合、まず最大の $G$ を持つ対 $(S_i, S'_i)$ が選ばれ、それに競合している対 $(S_j, S'_j)$ と $(S'_j, S'_i)$ はすべて却下される。次に、残った対の中で最大の $G$ を持つ対が選ばれるが、いまの場合は $(S_j, S'_j)$ 1つなのでそれが選ばれる。

#### 5. シーンの3次元B-REP

以上の処理の結果、左右画像で対応するセグメント対の視差から3次元空間上のセグメントの座標を求めることができる。視差は、セグメントの関数表現を用いて計算することができるのでサブピクセルの実数値で得られ、セグメント上の視差のバラツキもない。そして、セグメントのグループを用いて同一の平面または曲面を構成する3次元セグメントのリストを作成す

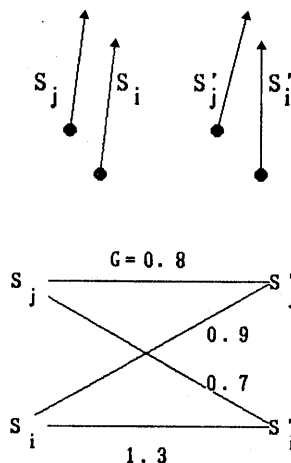


図12. 多重対応をしているバスの選択

ることにより、シーンの面-境界線-セグメントの3次元境界線表現を得ることができる。図13は、図3の3次元シーンの観測方向から見た正射影図、正面図、平面図、側面図である。片方のカメラでは見えない部分の距離も得られていることがわかる。まだ、水平に近いセグメントが特に左右のカメラのずれなどにより多少の誤差が生じている。今後の改良点として、

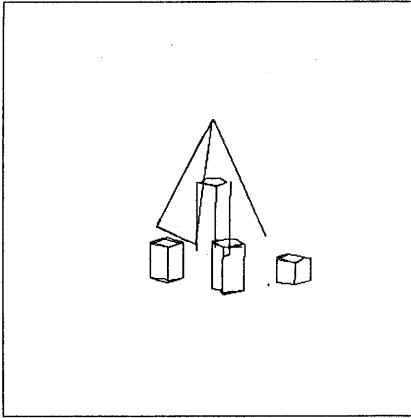
- ①ウィングド・エッジの導入によって対応の拘束を強化し、測定精度を高める。
- ②対応点をアフィン変換によって補正することによりさらに測定精度を高める。
- ③曲線の場合には、曲面拘束によるグループ化によって対応の拘束を強化し、測定精度を高める。

また、ステレオによって得られるシーンの3次元B-REPを用いて3次元物体認識<sup>10)</sup>の実験を行なう予定である。

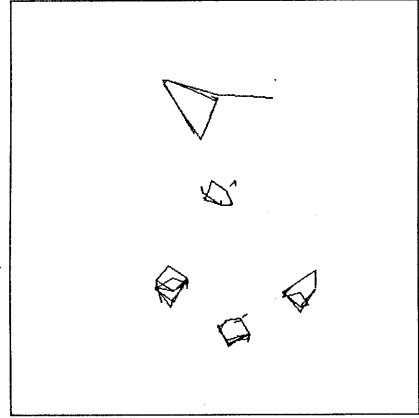
#### 謝辞

日頃有益な討論と助言をいただく白井制御部長、大島視覚システム研究室長、および視覚システム研究室の皆様へ感謝いたします。

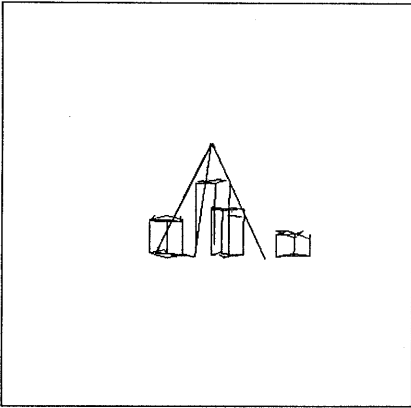




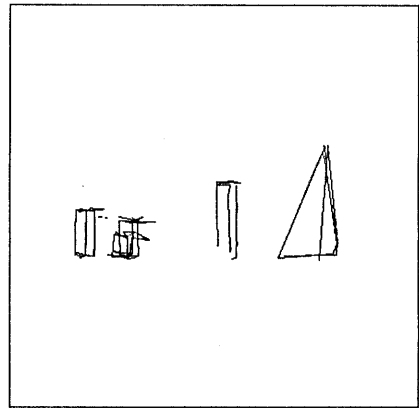
( a ) カメラの中心方向からの像



( d ) 上面像



( b ) 正面像



( c ) 側面像

図 1 3 . 3 次元 B - r e p

参考文献

- [1] 富田, ステレオ画像の領域の輪郭線セグメントに基づく対応, 情報会コンピュータビジョン研究 38-1, 1985.
- [2] Grimson, W. E. L., Computational experiments with a feature based stereo algorithm, IEEE Trans. PAMI-7, 1, 1985.
- [3] Ohta, Y. and Kanade, T., Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming, IEEE Trans. PAMI-7, 2, p. 139 1985.
- [4] 富田, 高橋, 画像のB-REPのためのアルゴリズム, 情報会コンピュータビジョン研究, 1987.
- [5] 富田, 金出, 三次元物体のエッジに基づいた記述の生成と認識, 情報会コンピュータビジョン研究 34-3, 1984.

付録 1

輻射カメラの座標系を  $(x, y, z)$ 、標準カメラの座標系を  $(x', y', z')$  とする。また、輻射カメラの画像への投影点の座標を  $(X, Y)$ 、標準カメラの画像への投影点の座標を  $(X', Y')$  とすると

$$\begin{cases} X = \frac{x}{z} \\ Y = \frac{y}{z} \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} x = zX \\ y = zY \end{cases}$$

であることから、カメラの輻射角が  $\theta$  の場合には次の関係が成立する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} zX \\ zY \\ z \end{pmatrix}$$

したがって、

$$\begin{aligned} X' &= \frac{x'}{z'} = \frac{\sin\theta + X \cos\theta}{\cos\theta - X \sin\theta} \\ Y' &= \frac{y'}{z'} = \frac{Y}{\cos\theta - X \sin\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

付録 2

標準カメラモデルにおいて、3次元平面

$$ax + by + cz = 1 \quad (1)$$

上の一点  $P(x, y, z)$  の一方のカメラ  $C$  の画像平面への投影点を座標を  $(X, Y)$  とすると、

$$\begin{cases} X = \frac{x}{z} \\ Y = \frac{y}{z} \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} x = zX \\ y = zy \end{cases}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{aX + bY + c} \\ y &= \frac{Y}{aX + bY + c} \\ z &= \frac{1}{aX + bY + c} \end{aligned} \quad (2)$$

を得る。他方のカメラ  $C'$  は  $(u, v, 0)$  だけ並行移動したところにあるとすると、カメラ  $C'$  から見た点  $P$  の位置  $(x', y', z')$  は②式より

$$\begin{aligned} x' &= x - u = \frac{X}{aX + bY + c} - u \\ y' &= y - v = \frac{Y}{aX + bY + c} - v \\ z' &= z = \frac{1}{aX + bY + c} \end{aligned} \quad (3)$$

となることから、点  $P$  のカメラ  $C'$  の画像平面上への投影点の座標  $(X', Y')$  は、次のように  $(X, Y)$  のアフィン変換で与えられる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{x'}{z'} \\ \frac{y'}{z'} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} X - u(aX + bY + c) \\ Y - v(aX + bY + c) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - ua & ub \\ 1 - va & vb \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} uc \\ vc \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

この変換が成立する重要な条件は、カメラの  $z$  座標が変化しないことである。特に、今回の場合は  $v=0$  なので  $y$  座標は変化せず、次のようにさらに簡単な変換となる。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - ua & ub \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} uc \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

したがって、逆に3点の対応点が見られると、アフィン変換のパラメータが求まり、さらにカメラ間距離  $u$  により平面の方程式を求めることができる。