

立体視による建築物の多面体構造の抽出

EXTRACTING POLYHEDRAL STRUCTURE OF BUILDINGS
BY STEREOPSIS

丸山 稔 阿部 茂

Minoru MARUYAMA Shigeru ABE

三菱電機 中央研究所

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp.

あらまし 画像から物体の形状を復元するには、距離情報を取得し、さらにそこから物体の構造を抽出することが必要である。対象物体が限定されている場合には、その性質を利用して、この問題に対して種々の簡略化を行うことができる。本報告では、多面体形状の建物を対象物体とした場合の、立体視に基づく概略構造復元のための一手法を提案する。本手法では、この場合に成立すると考えられる、稜の隣接性・平行性・鉛直性等の性質を用いる。画像間の対応付けは隣接性に基づく弛緩法によって行い、この結果から面の候補を検出する。面候補に対しては、面上パターンの認定、順序関係の確認等に基づいて検証を行い、これらを組合わせて多面体形状を抽出する。

Abstract In this article we describe a method for obtaining 3D approximation from the scene of a polyhedral building based on stereopsis. When some properties of the object are known, the problem can be simplified by making use of them. In our method, properties of the object such as adjacency and parallelism are used. Binocular matching is carried out by relaxation method based on adjacency of edges. From the result, faces are extracted and verified by their order relation and by checking patterns on them. Assembling these face fragments, 3D polyhedral approximation is extracted.

1. はじめに

近年の計算機技術の進展に伴ない、3次元CAD、3次元環境認識等の研究が活発に行われている。特に、3次元物体を投影した2次元画像から対象物体の3次元構造を復元し、モデルとして保持する機能の研究は重要な課題であり、さまざまな研究が行われている[4,7]。

2次元画像から物体の3次元構造を復元するためには、奥行情報の獲得が不可欠である。奥行情報の獲得のための手法としては、単眼視によるものと多重画像によるものがある。多重画像利用の一つとして、視点の異なる2枚の画像を用いて、3角測量に基づいて、対象物体上の各点までの距離を計測する両眼立体視による方法がある。これは、補助光などを必要とせず、屋外などの一般的な環境で用いることができ、奥行情

報獲得のための有力な方法である。この方法では、3角測量を行うためには、2枚の画像間で対応する点を認定する必要があり、動的計画法を用いる方法[8,9]や、coarse to fine法によるもの[2,6]、3眼立体視によるもの[5]などさまざまな方法が研究されている。

立体視を行えば、物体の特徴点の距離データを得ることはできるが、対象物体の形状を得るためには、これだけでは十分とは言えない。2次元画像から物体の3次元構造を復元し、保持するためには、距離データを取得すると共に、これらを統合し、物体として意味のある構造を抽出することが必要である。

本報告では、3次元CADのための入力法の一つとして、写真から立体視に基づいてプラント・建築物・大型機器などの3次元概略構造のモデルを計算機上に生成するための手法について述べる。ここでは、建築

物等の対象物は多面体であると仮定する。一般に、立体視により任意形状の物体の奥行情報を得るためには、物体上の各点の密な対応をとり、位置の計算を行うことが必要になる。しかし、対象物体の性質が既知である場合には、それらの種々の性質を利用することにより問題の簡略化を行い、形状を復元していくことができる。ここでは、対象物体が多面体であるとしているので、3次元構造を復元するためには、多面体の境界（接続点）の対応がとればよい[3]。本手法では、対応探索の対象として画像中から直線成分を抽出し、これらの対応付けに基づいて3次元位置の計測を行う。次にこれらの線分の距離データから面を抽出し、各面の“はりあわせ”を行うことにより得られた3次元位置計測結果を構造化し、多面体形状の物体モデルを復元していく。

2 立体視

2-1 前処理

本手法においては、入力として2枚の写真を用いることにより両眼立体視によって3次元位置の計測を行う。いま対象物体としては多面体を仮定しているので、3次元位置情報としては多面体の境界に関するものがわかればよい。このために、画像中から直線成分を抽出して、この直線成分間の対応付けを行うことを考える[10]。

画像中の直線成分抽出のために、まず入力写真(図1)に3x3 Sobelオペレータを用いてedge点を抽出する(図2)。次いで、このedge像に細線化処理を施し、直線のあてはめ、延長・連結等の処理を施し、最終的に図3に示すような入力線画が得られる。

2-2 対応探索

いま、カメラモデルとして図4のようなものを考える。ここにX-Y-Zは、3次元空間に導入した座標系、x-yは2次元画面上に導入した座標系、fは焦点距離である。Z軸は視線方向と一致しているとすると、3次元空間中の一点(X,Y,Z)から2次元画面上の点(x,y)への射影は、

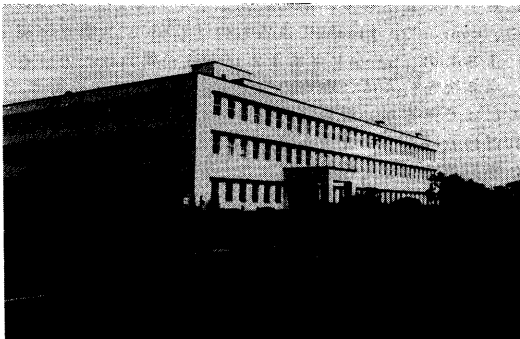


図1 入力写真

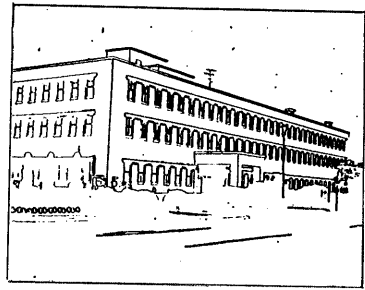


図2 エッジ像

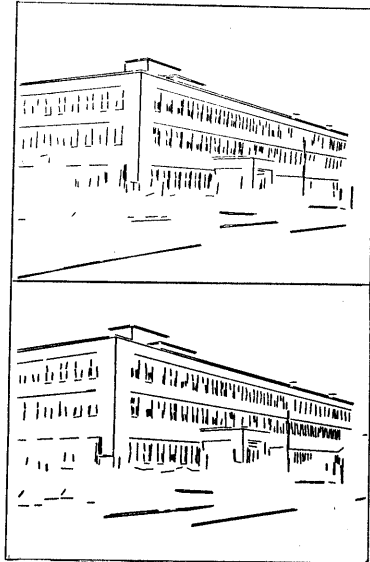


図3 入力線画

$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad (1)$$

で表される。いま視点の移動をそれと等価な物体の運動で考える。視点がX軸方向に $-T_0$ 平行移動したとすると、これに等価な物体の平行移動は、 $(T_0, 0, 0)$ となり、画面上の点(x,y)の移動は

$$x \mapsto x' = f \frac{X+T_0}{Z} \quad y \mapsto y' = y \quad (2)$$

で表されるから、対応点を決定しx軸上の変位

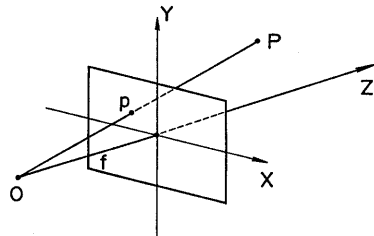


図4 カメラモデル

$u = x' - x$ を計算することにより 3 次元空間中の位置を、

$$(x, Y, Z) = \left(\frac{T_0}{u} x, \frac{T_0}{u} y, \frac{T_0}{u} f \right) \quad (3)$$

と計算できる (図 5)。一般にカメラ位置の変化と等価な物体の運動は回転 R と平行移動 T により表すことができるが、画像を変換することにより、 $R = I$ 、 $T = (T_0, 0, 0)$ として考えることができる。したがって以下では一般性を失うことなく、 $R = I$ 、 $T = (T_0, 0, 0)$ なる場合のみを扱えばよい。なお、以下では $T_0 > 0$ であり、変換後の座標系において、 Y 軸は地表に対して鉛直となっているものとする。このとき 1 枚目の画像上の点 (x_0, y_0) に対応する点は $y = y_0$ 、 $x > x_0$ 上 (エビポーラ線上) を探索すればよい。

探索を行う各線画は線分のリストから成るが、各線分はまず線の向きによって分類される。いま対象として建物を考えているので、生じる線分としては、3次元空間中で地表に対して垂直な線分から生じたものが多いと考えられる。いま、座標変換後のこのような線分は、 y 軸に対して平行となる。このような線分を以下では垂直線と呼ぶこととする。また、直線上の各点のエビポーラ線が、その直線自身と一致するようなものを水平線と呼ぶこととする。分類としては、このような垂直線、水平線、及びそれ以外の線分の 3 つを考え、対応付けはこれらの各クラス内で行なうものとする。なお、各線分は始点と終点の座標を値として持つ。このとき始点 $\pi_1 = (x_1, y_1)$ 終点 $\pi_2 = (x_2, y_2)$ は

- ・水平線 : $x_1 < x_2$
- ・それ以外 : $y_1 < y_2$

となるように選ぶ。さらに、各線分はその長さ、角度及び両側の明るさの平均値 I_L, I_R も値として持つ (図 6)。

画像から抽出され、分類された各線分について、クラスごとに対応探索を行う。いま対象物体は多面体であると仮定しているため、3次元構造復元のためには多面体の境界線 (接線点) の対応付けを行えばよい。このために、線分の隣接性に着目し、まず各線分ごとに対応候補のリストと、その初期確率を求め、隣接性に基づく弛緩法によって確率値を更新していき対応を

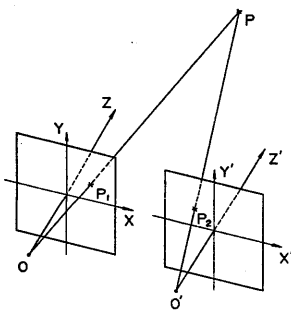


図 5 立体視モデル

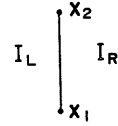


図 6 線分データ

求めることを考える。対応の候補は、式 (3) に示すようにエビポーラ線上の対応を基にして決めるが、具体的には

- ① 線分の長さ比の比較
- ② エビポーラ線による重なり度
- ③ I_L, I_R の比較

等を考慮して決める。なお、対応付けにおいては、1 枚目の画像から 2 枚目の画像への対応と、その逆の方向の対応を共に考慮すべきであるが、以下では 1 枚目の画像から 2 枚目の画像への対応についてのみ議論する。以下に具体的な対応候補となるための条件と対応確率の計算法を示す。

<< 対応条件及び対応確率の計算 >>

いま、1 枚目の画像の線分 1 の端点を $\pi_1 = (x_1, y_1)$ 、 $\pi_2 = (x_2, y_2)$ 中点を $\pi_p = (x_p, y_p)$ とおき、2 枚目の画像の対応探索の相手の線分 1' の端点を π'_1, π'_2 中点を π'_p とおく。また、各画像中における最大長の線分の長さを 1 としたときの線分の長さ (比) をそれぞれ s_1, s_2 とおく。水平線の場合 (図 7)、水平線以外の場合

(図 8) の対応候補となるための条件、及びこれらを満たす組 (l, l') の対応確率値 $p(l; l')$ の計算法は次のようなものを用いた。(なお、3 つの線分のクラスのうち、水平線以外の 2 つについては同じ計算法を用いた。)

<水平線の場合>

- (i) $x_1 < x'_1$ or $x_2 < x'_2$
- (ii) $d_1 = |y_p - y'_p|$ $d_1 < \theta_1$
- (iii) $d_2 = \min(s_1/s_2, s_2/s_1)$ $d_2 > \theta_2$
- (iv) I_L, I_R の大小関係が同じ。すなわち、
 $(I_L(l) - I_R(l)) \cdot (I_L(l') - I_R(l')) > 0$

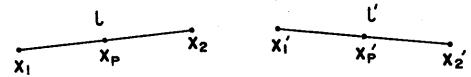


図 7 水平線

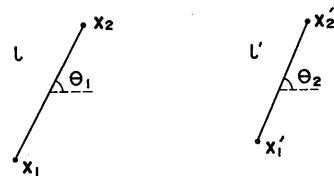


図 8 水平線以外の線

・初期確率

$$p(1; 1') = [(1 + \alpha d_2)/(1 + \beta d_1)]$$

<水平線でない場合>

- (i) $y_1 = \max(y_1, y_1'), y_2 = \min(y_2, y_2')$
 $y_1 < y_2$
- (ii) $s_x = \max(y_2 - y_1, y_2' - y_1'), s_n = y_2 - y_1$
 $d'_0 = s_n/s_x, d'_0 > \Theta'_1$
- (iii) $x_1 < x_1' \text{ or } x_2 < x_2'$
- (iv) $d = \min(s_1/s_2, s_2/s_1) \quad d > \Theta_2$
- (v) $|\theta_1 - \theta_2| < \Theta'_2$
- (vi) $d'_1 = |y_1 - y_1'|, d'_2 = |y_2 - y_2'|$
 $d'_1 < \Theta'_3 \text{ or } d'_2 < \Theta'_3$
- (vii) I_L, I_R の大小関係が同じ。
 $(I_L(1) - I_R(1)) \cdot (I_L(1') - I_R(1')) > 0$

・初期確率

$$p(1; 1') = [(1 + \beta d'_0)/(1 + \alpha (d'_1 + d'_2))]$$

ここに、 $\Theta'_1, \Theta'_2, \Theta'_3$ は閾値、 $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ は定数、 (\cdot) は正規化を示す。

多面体の境界の部分の対応を求めるために、隣接性に着目して、弛緩法によって確率値の更新を行う。多面体は局所的には図9のような構造をしているとみなすことができるので、この図のように、1のi番目の隣接線を w_i 、1'のi番目の隣接線を w'_i とする。但し、このとき隣接線となるためには、1、 w_i によつて構成される面に相当する領域をFとおくと、

$$|I_F(1) - I_F(w_i)| < \Theta$$

なる関係を満たさなければならない。ここに、 I_F は領域Fに相当する I_L または I_R を示す。多面体の境界である線分は、画像中で隣接線を持つことが考えられ、この隣接関係は隠れなどが無い限り保存されることが期待されるので、これらの隣接線同士の対応を用いて確率値の更新を行う。いま、時点kにおける $(1, 1')$ の対応確率を $p^k(1; 1')$ と書く。確率値の更新は以下のようにして行われる。

・隣接線からの寄与の計算

$$q^k(1; 1') = \sum_{i=1}^4 \rho_i(1; 1') p^k(w_i; w'_i)$$

但し、隣接線がないときは $q^k(1; 1') = 0$ 、 ρ_i は、1、 w_i の隣接点と1'、 w'_i の隣接点がエピポーラ線上にあるときは1、他の場合は0、水平線の場合は $\rho_i = 1$ とする。

・確率値更新

$$\hat{p}^{k+1}(1; 1') = \begin{cases} p^k(1; 1')(1 + \lambda q^k(1; 1')) \\ (q^k(1; 1') > 0 \text{ のとき}) \\ \mu p^k(1; 1') \\ (q^k(1; 1') = 0 \text{ のとき}) \end{cases}$$

ここに $\lambda > 0, 0 < \mu < 1$ である。時点k+1に於ける $(1; 1')$ の対応確率 $p^{k+1}(1; 1')$ は $\hat{p}^{k+1}(1; 1')$ を正規化して得る。

この操作の繰返しにより、隣接線同士の対応がとれ

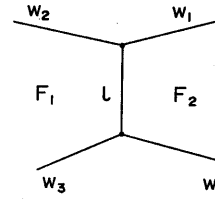


図9 多面体の隣接構造

ない場合は対応確率が減少し、隣接線が対応する場合は確率値が増加していく。数回の繰返し後、対応候補リスト中のただ一つの線分に対して高い対応確率を持つような組を対応が確定した組とする。

3. 3次元構造の復元

対応が確定した線分の組からは、3次元位置を計算することができる。いま、対象物体は多面体であると仮定しているので、物体の3次元構造を復元するためには、これらの距離データから多面体としての構造を抽出しなければならない。本手法では、線分対応から次のような処理により概略多面体構造を抽出していく。

① 線分の3次元構造の計算

② 多面体形状の復元

(i) 面の生成・検証

(ii) 立体の生成

以下、各処理について述べる。

3-1 線分の3次元構造の計算

対応の確定した線分の組 $(1, 1')$ から、その3次元構造を復元することを考える。ここで確定している対応は点同士の対応ではなく、線同士の対応であるので、直線と直線の対応に基づいて3次元構造を復元する。

いま1枚目の画像中の線分1を表す2次元画像上での直線の式を

$$c \cdot \tilde{x} = c_1 x + c_2 y + c_3 f = 0$$

$c = (c_1, c_2, c_3)$, $\tilde{x} = (x, y, f)$, $\|c\| = 1$ とする。ここに、fは焦点距離である。また、線分1に相当する3次元空間中での直線の式を

$$X(t) = a \cdot t + b$$

$$\|a\| = 1, a \cdot b = 0$$

とする。このとき、1枚目、および2枚目の画像上の直線をそれぞれ c, c' とすると、3次元空間中での直線の構造は、この対応から、

$$a = c \times R^T c' / \|c \times R^T c'\|$$

$$b = c' \cdot T \{ (c \cdot R^T c) c - R^T c \} / (1 - (c \cdot R^T c)^2)$$

によって計算することができる。ここにR、Tはカメラ位置の変化を物体の運動としたときの回転と平行移動である。但し、エピポーラ線と一致する線の場合は $c = R^T c'$ となり、この方法では3次元構造を復元することができない。この場合は方向ベクトル a を

$$a = R^T T / \|R^T T\|$$

であると仮定する。(これは平行移動のみの $R = I$

なる場合について考えると、方向ベクトルと平行移動の方向が一致していることを仮定していることになる。) エピボラ線と一致しない線(水平線以外の線)については端点等の対応から式(3)により \mathbf{a} 、 \mathbf{b} を求めることもできる。

以上の処理により、線分の3次元構造を決定することができるが、結果の信頼性の向上や、後の面の検出のために、本手法では、次のような処理を行う。

< 平行線群の検出 >

対応が確定した場合は上の方法によって3次元構造を計算することができるが、線画にはエッジ抽出、粗線化、直線のあてはめ等の処理による誤差が含まれていると考えられるので、単一の対応だけから計算された3次元構造は信頼性に欠けるおそれがある。ここでは、対象物は多面体形状の建物であるとしているので、シーン中の線分は、3次元空間中で平行である直線から生じたものが多く含まれていることが考えられる。そこで、方向ベクトルの計算結果の信頼性を向上させるために、対応の組の中から3次元空間中で方向ベクトルが平行な集合を抽出し、各集合中の方向ベクトルの計算結果の平均化を行い、これを方向ベクトルの値であるとする。平均化は、対応が確定した線分の中で閾値 s 以上の長さを持つものについて行う。

< 鉛直面上の平行線群検出 >

平行線群の検出時には、3次元空間中で平行であると判定された各線分集合の中で、さらに、同一平面上に属していると判定される集合を抽出する。但し、このとき探索する線分は垂直線以外の線分であるとする。対象としては建物を想定しているため、この場合地表に対して鉛直な面が多く存在することが考えられる。そこで、ここでは特に鉛直面を抽出すべき面として扱う。以下、面を方程式を $\mathbf{n} \cdot \mathbf{X} = d$ を用いて表す。ここに \mathbf{n} は法線である。地表に対して鉛直なベクトルを \mathbf{v}_1 で表すと、抽出すべき鉛直面の法線ベクトルは平行線群から平均化して得られた方向ベクトル $\hat{\mathbf{a}}$ を用いて、

$$\mathbf{n} = \hat{\mathbf{a}} \times \mathbf{v}_1 / \|\hat{\mathbf{a}} \times \mathbf{v}_1\|$$

で表すことができる。各平行線群中の線分は画像上での長さ順に選び、この線分 l_c を面の“核”と考え、 $d_c = \mathbf{n} \cdot \mathbf{b}_c$ を計算する。次いで、残りの線分 l_i について l_c から仮定される面に属すかどうかの判定を行う。同一面判定は以下の条件に基づいて行う。

- (i) $d_i = \mathbf{n} \cdot \mathbf{b}_i \quad |d_i - d_c| < \epsilon$
- (ii) 各画像について l_c と l_i の重なり度が高い。すなわち、 l_c の端点を $\mathbf{p}_1 = (p_1, q_1)$
 $\mathbf{p}_2 = (p_2, q_2)$ 、 l_i の端点を $\mathbf{x}_1 = (x_1, y_1)$
 $\mathbf{x}_2 = (x_2, y_2)$ 、 $u_1 = \max(p_1, x_1)$
 $u_2 = \min(p_2, x_2)$ $s_o = x_2 - x_1$
 $s_1 = u_2 - u_1$ としたとき、
 $s_1 > 0$ 、 $s_o / s_1 > \theta$

3-2 多面体形状の復元

対象物体の形状を復元するためには、線分の3次元構造のデータから多面体構造を抽出しなければならない。本手法においては、まず線分データから多面体の構成要素である面を検出し、これらを組み合わせることにより、概略多面体構造を抽出することを考える。面の検出も対応付けと同様に、基本的には線分の隣接性に着目して行う。これらの隣接線分から成る面候補と共に、本手法では平行線群から検出された仮想鉛直面も面の候補として扱う。検出された面候補については、面上パターンの認定を行い、対応未確定の線分の3次元構造を推定すると共に、面候補の検証を行う。また、このとき、面候補間の順序関係の整合性によっても面の検証を行い、偽の面を除去していく(図10)。以下、各処理について述べる。

3-2-1 隣接性による面候補検出

多面体を構成する面を切り出していくために、対応付けられた線分の中で、隣接線を持つものを面の境界線の候補として検出する。線画に含まれる隣接線の中には、面の境界線だけでなく、窓、模様等の、面上のパターンとしてとらえることができるものも含まれていることが考えられる。これらは、画像上で面の境界線に比べて短い線分から成るとしてよいから、面の境界線を検出するために、適当な閾値 s_o を設定し、2次元画像上での線分の長さ s が $s > s_o$ を満たす線分からなる隣接線の組を検出して、面の候補とする。この面の候補の隣接線の組 (l_1, l_2) について、線分及び接点の対応から、

$$\mathbf{n} = \mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2 / \|\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2\|, \quad d = \mathbf{n} \cdot \mathbf{X}_o$$

によって面の方程式 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{X} = d$ を計算することができる。ここに $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ はそれぞれ l_1, l_2 の3次元空間での方向ベクトル、 \mathbf{X}_o は隣接点の位置ベクトルであり、 d が $d > 0$ となるように符号を選ぶものとする。

次に、これらの面候補の集合の中から同一面を構成するとみなされる線分の組を統合し、閉じた面を得ることを考える。いま、隣接線の組を $L_i = (l_{i1}, l_{i2})$ とおき、同一面となるための条件として次のようなものを用いる。

- (i) $|\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j| > 1 - \epsilon$
- (ii) $|d_i - d_j| < \epsilon$
- (iii) 共通な線を持つ。($L_i \cap L_j \neq \phi$)

隣接線分の組 同一鉛直面上の平行線群

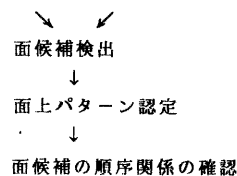


図10 処理の流れ

(iv) 共通な面領域 F だと判定される側の明る

さの平均値を $I_F(L_i)$ 、 $I_F(L_j)$ とおくと、

$$|I_F(L_i) - I_F(L_j)| < \epsilon$$

これらを満たす集合の和 $\cup L_i$ を新たに一つの面候補と考える。

これらの処理によっても閉じた面とならなかったものについては閉領域を仮定していく。このとき、面の延長操作により、3つ以上の構成稜からなる面候補については、隣接稜を持たない2端点を結んで閉じた領域を仮定する。2つの稜のみから成っている面候補については、それらの構成稜から平行四辺形を仮定して閉じた領域を仮定する。但し、このとき隣接稜を持たない端点を含む稜については、1枚目と2枚目の画像上では、とぎれ等の影響で、長さが異なることが考えられるが、復元される3次元空間中での長さが長くなるように端点を決める。

3-2-2 面上パターン認定・面の検証

これまでの処理によって得られた面候補の中には偽の面が含まれていることが考えられるので、仮定された面の実在を検証することが必要になる。いま、対象物体は多面体であることを仮定しているので、画像から抽出された直線成分は、3次元空間中では多面体の境界線であるか、又は多面体を構成する面上のパターンであると考えられる。したがって、抽出された隣接稜から仮定された面を1枚目、2枚目の画像に投影した閉領域を考えると、この領域内にある直線成分は、面の手前にある3次元構造物であるか、面上のパターンであるとみなしてよい。ここでは、面上パターンの認定により、対応未確定な線分の構造を推定すると共に、これにより、面の存在の確認を行う。また、確認された面と他の面候補との視線方向の順序関係の整合性により偽の面の除去を行う。

以下、各処理について述べる。なお、これらの処理は、各面候補の中で、仮定されたものでない構成稜の長さが長いものから順に行うものとする。

< 予測線画生成 >

面候補を F 、 F を1枚目、2枚目の画像上に射影した閉領域をそれぞれ F_1 、 F_2 とおく。このとき F_1 上にある線分で面候補の構成稜でないものを抽出し、これを F 上のパターンであると仮定する。この仮定の下では、 F を表す平面の式 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{X} = d$ より、 F 上の線分 l の端点 $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ の3次元空間での位置ベクトル $\tilde{\mathbf{x}}_i$ を

$$\tilde{\mathbf{x}}_i = d \tilde{\mathbf{x}}_i / \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_i \quad (4)$$

と計算できる。なお、ここに $\tilde{\mathbf{x}}_i = (x_i, y_i, f)$ である。これにより、 F 上のパターンから予測される F 上の線画を生成できる。

< 面上パターンの認定 >

F 上の線分 l の始点、終点を \mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 、これから予測される F 上での始点、終点を $\hat{\mathbf{x}}_1$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_2$ とする。こ

のとき、以下の条件を満たす2枚目の画像中の線分 l' が存在するときは、 l は F 上のパターンであるとする。

$$(i) \hat{\mathbf{x}}_1 \in F_2 \text{ or } \hat{\mathbf{x}}_2 \in F_2$$

$$(ii) \hat{\mathbf{x}}'_1 \in F_2 \text{ or } \hat{\mathbf{x}}'_2 \in F_2$$

(iii) $\hat{\mathbf{x}}_i$ を l' へ射影した点を $\hat{\mathbf{p}}_i$ とおき、

$$h_i = \|\hat{\mathbf{x}}_i - \hat{\mathbf{p}}_i\| \text{ とすると、} h_i < \theta_1$$

(iv) l が水平線である場合 $\|\hat{\mathbf{x}}'_2 - \hat{\mathbf{x}}'_1\| < \theta_2$

(v) l が水平線以外の場合は、

$$q_1 = \max(y'_1, \hat{p}_1), q_2 = \min(y'_2, \hat{p}_2)$$

$$q_2 > q_1, (q_2 - q_1) / (y'_2 - y'_1) > \theta_3$$

F 上のパターンであると仮定された線分数を N_1 上の条件を満たす線分数を N_0 とするとき、 $N_0 / N_1 > \theta$ を満たす場合は、仮定された面 F は存在が確認されたものとする。ここに θ は閾値である。

< 順序関係の確認 >

面 F が確認されたとき、 F_1 、又は F_2 に他の面候補の、仮定されたものではない構成稜が含まれているような場合は、視線方向の順序関係により、面の検証を行う。構成稜として領域 F_1 (または F_2) 上に含まれるものを持つ面候補を F_0 とすると、 F_0 は F よりも手前になければならない。いま、 F の方程式を $\mathbf{n} \cdot \mathbf{X} = d$ 、 F_0 の方程式を $\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{X} = d_0$ とし、 F_1 (または F_2) 上に含まれる F_0 の構成稜の隣接稜を持つ側の任意の点を $\mathbf{x}_p = (x, y)$ 、 $\tilde{\mathbf{x}}_p = (x_p, y_p, f)$ とおく (図11)。このとき \mathbf{x}_p の F_0 への射影は F への射影点より手前にならなければならないから、式 (4) より、

$$(d / \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_p) > (d_0 / \mathbf{n}_0 \cdot \tilde{\mathbf{x}}_p)$$

を満たさなければならない。この関係式を満たさない F_0 は、偽の面であると考え、面候補から除去する。

3-2-3 仮想鉛直面の処理

平行線群検出の際に得られた同一鉛直面上の線分集合についても、上と同様に、閉じた面領域の仮定、面の確認、面上パターンの認定を行うことを考える。このとき、面上にあると判定された線分集合の中には、既にこれまでの処理によって得られた面の構成稜となっている線分を含んでいなければならないものとする。(但し、その面が鉛直面であるときには、この条件を満たす集合であっても、その集合は既に処理済みであると考えて、以下の処理は行わないものとする。)

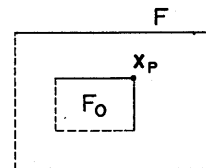


図11 順序関係の確認

< 閉領域の仮定 >

鉛直面を仮定するために、閉領域を設定することを考える。ここで、鉛直面上の平行直線群を $L = \{l_i\}$ とおき、 $l \in L$ なる線分の始点、終点をそれぞれ、 $x_1(l), x_2(l)$ とおく。いま L は各 $l_i \in L$ を延長したときの y 軸との交点 y_i の値の順に並んでおり、この順に処理を進めるものとする。閉領域の境界線は、平行線と垂直線により構成していく。このうち、2本の平行な境界線を L 中の最初と最後の稜、すなわち $\min(y_i), \max(y_i)$ を与える稜から構成する。残りの両端点側の境界線は、以下のような場合分けに基づいて、始点、終点の両側について仮定していくものとする。

①すべての端点がある他の線分との隣接点ではないときには、

$$\text{始点の場合 } x_b = \min\{x_1(l_i)\}$$

$$\text{終点の場合 } x_b = \max\{x_2(l_i)\}$$

を用いて、 $x = x_b$ により境界を仮定する。

②端点集合の中に隣接点が含まれる場合は、これを順番に $P_k = (p_k, q_k)$ ($k = 1, \dots, m$) とおく。これらの点を結びごとにより、順次、以下のように境界線を仮定していく。

(i) P_i が l_i ($i \neq 1$) の端点のときは、 l_i より上側の境界線は $x = p_i$ であるとする。

(ii) P_k, P_{k+1} 間の境界線は、 P_k, P_{k+1} がそれぞれ l_k, l_j の端点であるとし、いま終点側の境界線を考えているとすると、

(ii-1) $p_{k+1} - p_k > \epsilon$ のときは、 P_k から l_j へ3次元空間で鉛直となるように下した垂線の足 q_k を用いて、折れ線 $P_k q_k P_{k+1}$ によって境界線を仮定する。

(ii-2) $|p_k - p_{k+1}| < \epsilon$ のときは、この関係を満たす限り探索を続け、

$p_b = \max(p_k)$ を用いて、 $x = p_b$ によって境界線を仮定する。

(ii-3) $p_k - p_{k+1} > \epsilon$ のときは、 P_k から l_k へ3次元空間で鉛直となるように下した垂線の足 q_k を用いて、折れ線 $P_k q_k P_{k+1}$ によって境界線を仮定する。

(ii) の条件はすべて終点側に関するものであるが、始点側の境界を生成する場合は、(ii-1)、(ii-3)の不等号を逆にし、(ii-2)において \max の代りに \min を用いればよい。鉛直面としては、上の方法によって得られた始点、終点側の境界線と、 L 中の最初と最後の稜により生成される閉領域を用い、これについて面上パターンの認定、偽の面の検出等を前と同様の方法によって行う。

< 半隣接線の処理 >

とぎれ等により隣接性が失われている場合を考慮して、片側の画像でのみ隣接している線分の組からも面を仮定していくことを考える。ここまでの処理で、構造が確定していない線分で、片方の画像でのみ隣接し

ている組を (l_1, l_2) 、これらと対応する他の画像上の線分の組を (l'_1, l'_2) とおく。これらの中で、以下の条件を満たすものは面候補であると考えられる。

(i) (l_1, l_2) の隣接点に対応する (l'_1, l'_2) の端点 x_p, x'_p が近接している。

$$\|x_p - x'_p\| < \epsilon$$

(ii) l'_1, l'_2 を延長してできる隣接点に相当する点を $x_o = (x_o, y_o)$ 、 (l_1, l_2) の隣接点を $x_p = (x_p, y_p)$ とおくと、 x_o, x_p はエピポーラ線上にある。

$$|y_o - y_p| < \epsilon$$

(iii) 面領域 F と考えられる側の I_L, I_R の値をそれぞれ $I_F(l_i), I_F(l'_i)$ とおくと、

$$|I_F(l_i) - I_F(l'_i)| < \epsilon$$

以上の条件を満たすものについては、 (l'_1, l'_2) を延長して隣接させた線分の組をあらためて (l'_1, l'_2) として、対応 $((l_1, l_2), (l'_1, l'_2))$ から面候補を生成する。この面候補を用いて、前と同様に面の確認、面上パターンの認定等の処理を行って面を生成していく。

3-2-4 立体の生成

ここまでの処理によって確認された面候補及び消去されずに残っている面候補を組み合わせて、立体を生成していくことを考える。面候補は、いま閉領域として仮定されているが、この閉領域を構成する頂点のうち、画像上でも2つ以上の稜の端点となっている(仮定されたものではない)頂点に着目する。これらの点は、互いに隣接する面に共通に含まれる点であると考えられる。したがって、これらの頂点に集まる面を統合することで立体を構成していくものとする。なお、以下では、立体として3面頂点から成る多面体のみを想定して議論を進める。

< 三面頂点の生成 >

3面頂点生成のために、面集合 $\{F_k\}$ の中で次の条件を満たす集合を探索する。

(i) 閉領域仮定時の仮設頂点以外の頂点が、

$$\|P_i - P_j\| < \epsilon, P_i \in F_i, P_j \in F_j$$

なる近接条件を満たす。

(ii) F_i, F_j の P_i, P_j を端点に持つそれぞれ2本ずつの稜のうち、同じ方向ベクトルを持つ稜 $l_i \in F_i, l_j \in F_j$ が存在する。

この条件を満たす集合を探索することにより、近接端点の集合と、同じ方向ベクトルを持つ稜の集合が得られる。いま対象としては、3面頂点多面体を想定しているため、得られる方向ベクトルは3種類となる。これらの集合から、まず頂点集合から平均化により頂点 \hat{P} を計算し、各稜については、同じ方向ベクトルを持つ稜集合の中で最大長のものを選び、集合

$$\langle \hat{P}, l_1, l_2, l_3 \rangle$$

を得る。3面頂点生成は、このようにして得られた3本の稜の平均長が長いものから順に行う。

3面頂点を構成する稜は、各 l_i の端点を直線 $\hat{P} + a_i t$ へ射影して得る。ここに a_i は l_i の方向

ベクトルである。 \hat{P} を中心とする3つの面はこれら3本の稜からそれぞれ2本ずつを選んで構成される。いま、その面をFとおき、2本の稜を l_1 、 l_2 とおく。また、3面頂点 \hat{P} を構成するもとなった面候補集合のうち、 l_1 、 l_2 に相当する2本の稜を構成稜として持つものの集合を S_F とする。面Fは次のような場合分けにもとづいて生成される。

- (i) $S_F = \phi$ 及び すべての $F_0 \in S_F$ が l_1 、 l_2 に相当する2本の稜から閉領域を仮定されたものである場合はFを稜 l_1 、 l_2 から平行四辺形近似によって計算する。
- (ii) それ以外の場合は、 \hat{P} と隣接する他の3面頂点候補 \hat{Q} を次に処理する。但し、3面頂点 \hat{Q} は、 \hat{Q} から直線 $\hat{P} + \mathbf{a}t$ への射影 \hat{Q} を用い、稜の計算は前と同様にして行う。ここに \mathbf{a} は \hat{P} 、 \hat{Q} を結ぶ稜の方向ベクトルである。

3面頂点に関する処理の後には、鉛直面の処理を行う。いま、対象物体は建物であるから、個々の立体は浮遊していることは考えられず、地表上にあるか、他の面の上に乗っていると考えられる。そこで、ここでは地表に対して垂直な面をとり、これが延長可能である場合は、他の面や地表まで延長する。

4 実験例

図1に示すような2枚の写真を用いて、上の手法に基づき、多面体形状の建物の概略構造の復元を試みた。撮影された写真はCCDカメラにより読み込み、1024 x 800 画素からなる画像に変換した。この画像を用いて、2章で述べたようにエッジ検出、2値化、細線化、直線のあてはめ、線の連結等の処理を施した。これにより得られた線画(図3)から、立体視により多面体形状を復元した。図12にこれを種々の視点からの像に変換したものを示す。ここで、一連の処理の結果の立体は体積表現としてではなく、面の組合わせとして得られており、隠れて見えない面については何の処理も行っていない。

5 むすび

2枚の写真から多面体形状の仮定の下に、立体視によって物体の3次元概略構造の復元を行うための一手法を示し、その実験を行った。

対象物体が建築物のような大型の物体であり、屋外にある場合には、立体視が有効な距離データ取得のための手法である。2次元画像から物体の3次元形状を得るためには、3次元距離情報を得て、さらにそこから物体として意味のある構造を抽出しなければならないが、対象物体に関して何らかの性質が既知である場合には、それを利用して問題の簡略化を行うことが可能である。本報告では、対象物体を多面体形状の建物と仮定し、この場合に成立すると考えられる隣接性、平行性、鉛直性等の種々の性質を利用して面を仮定し、面上パターンの認定、順序関係の確認等によりこれらの面仮定の検証を進める形で3次元形状の復元を試みた。

ここに述べた手法は、まだ単純な直方体の組合せのような形状に対して適用したのみであり、複雑な形状に対しては、まだまだ多くの考察を加えることが必要である。これらのうち、ノイズに対して頑健な手法の確立、及び、視点を増加させ、物体モデルをより完全なものにし、計測値の精密化をはかることなどが今後の課題として挙げられる。

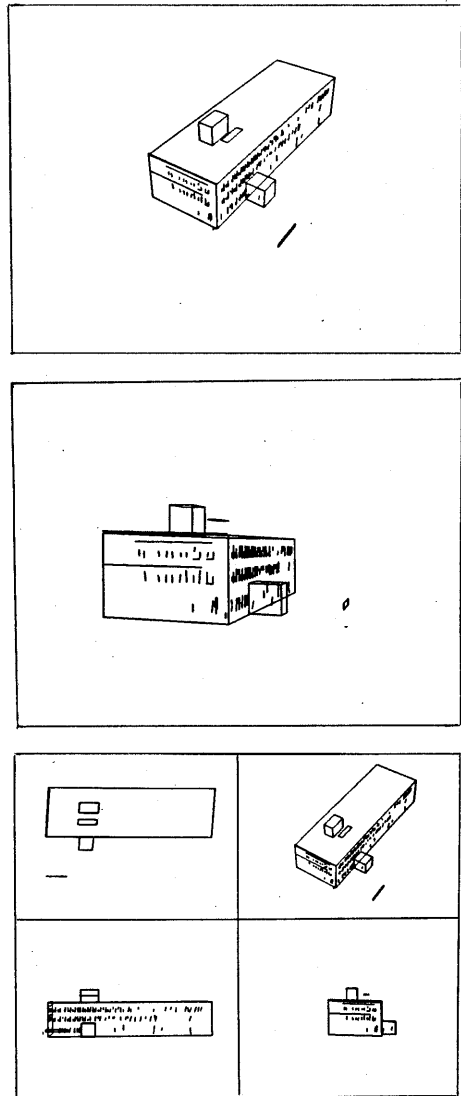


図12 実験結果

参考文献

- [1] S.T.Bernard and W.B.Thompson, Disparity analysis of images, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. PAMI - 2, pp.333 - 340 (1980)
- [2] W.E.L.Grimson, From images to surfaces, M.I.T. Press (1981)
- [3] M.Herman, T.Kanade, and S.Kuroe, Incremental acquisition of a three - dimensional scene model from images, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. PAMI - 6, pp. 331 - 340 (1984)
- [4] T.Kanade, Geometrical aspects of interpreting images as a three - dimensional scene, Proc. IEEE, Vol. 71, pp.789 - 802 (1983)
- [5] 北村,来海,谷内田,エッジの連続性と局所情報を利用した3眼視, 信学技報 PRU 86 - 2 (1986)
- [6] D.Marr, A computational theory of human stereo vision, Proc. Roy. Soc. London, Vol. B204, pp. 301 - 328 (1979)
- [7] D.Marr, Vision, Freeman (1982)
- [8] 大田,正井,池田, 動的計画法によるステレオ画像の区間対応法, 信学論(D), Vol.J68-D, No.4, pp. 554 - 561 (1985)
- [9] 大田,金出, 走査線間の整合性を考慮した2段の動的計画法によるステレオ対応探索, 情報処理 Vol. 26, No. 11, pp. 1356 - 1363 (1985)
- [10] 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, 情処会コンピュータビジョン研究会資料 38 - 1 (1985)
- [11] 日本写真測量学会編, 写真による3次元測定, 共立出版 (1983)