

膜の歪エネルギー最小によるステレオマッチング

服部 進

大谷 仁志

海野 展靖

福山大学工学部情報処理工学科

(株)トプコン

清水建設

再構成された曲面が最も平坦になるようにエッジの対応付けを行なうステレオ画像の対応法を示した。まずエッジ位置での3次元座標が与えられているとき、対象の曲面を内挿する方法を議論し、膜面の内挿式が最も好ましい結果を与えることを簡単な実例で示した。この曲面は膜面のポテンシャルエネルギーを最小にする。次に可能な偏差の組合せに大して、膜面のポテンシャルを最小にする組合せを選び出す式を導いた。このためグリーン関数を利用するとより簡潔に式を表わせることを示した。この式を使って正6面体のステレオ線画図形を対応付けしてポテンシャルのとり値を調べるとともに、正しい偏差の組合せが得られることを示した。最後に実際の空中写真画像に適用してこの方法の効果を実証した。

A Stereo Matching Method Minimizing The Potential Energy of Membrane

Susumu Hattori

Hitoshi Ohtani

Nobuyasu Unno

Dep. of Information Processing
Faculty of Engineering
Fukuyama Univ.

Topcon Co. Ltd.

Shimizu Construction Co. Ltd.

985 Aza-sanzo, Higashimuracho,
Fukuyama

75-1 Hasunumacho,
Itabashi-ku,
Tokyo

1-8-1 Kyobashi, Chuoh-ku,
Tokyo

This paper discusses a method of matching edges of stereo images considering the surface shape reconstructed by interpolation of disparities. The basic idea is that the surface between edges should be reconstructed as flat as possible. The paper firstly compares the property of the interpolation function using a simple example and shows that the membrane interpolation has an appropriate property to our purpose. The flattest surface has a minimum potential energy. Secondly the formula to calculate the potential energy is derived by use of the Green's function. Our matching principle is successfully tested on a stereo figure of a hexagon. Lastly the method is applied to a stereo image of large scale aerial photographs.

1. はじめに

立体視を計算機によってシミュレーションする技術、すなわちステレオマッチングは写真測量やロボティクスの分野で期待が大きい技術である。本質的にはこれはステレオ画像の対応点(あるいは偏差の値)を自動的に見いだそうとするものである。対応付けの方法としては、面積相関法、エッジの対応付け、および分割した画像部分の対応付けなどがある¹。

この中ではエッジ間の対応付けに多くの議論が集中している。この方法は、ステレオ対応の最も困難な問題であるオクルージョンの処理に対処できる可能性が高い。エッジ間の対応付けでは、なんらかの意味で「似たエッジ」を左右画像から拾い出して対応付けるものである。「似たエッジ」は複数個あることが多いので、対応候補の中から誤ったエッジを取り除く方法が議論の中心である。この論文は対応付けの結果再構成される対象の曲面が、最も平坦になるように対応候補を拾い出せば、非常に信頼性の高い対応付けができることを示したものである。

最近の対応付けの手法では、なんらかのエネルギーを最小にするという観念を取り入れているものがみられる²。著者の方法もこれに分類できる。著者の方法は画像の部分に似ているという条件ばかりでなく、マッチングの結果再現される対象の形を最適化の拘束に入れたものである。

Grimson³ は、Harrのモデル⁴で対応付けたエッジ位置での偏差の離散的マップから、偏差間を内挿して連続した「自然な曲面」を得る手続きを議論した。Grimsonのモデルは与えられた偏差の間を滑らかな曲面で内挿するものであって、数学的には所々で変位の与えられたときの板の方程式を解くのと同値である。またTerzopoulos⁵ は偏差の内挿をHarrの多段階のマッチングモデルと結びつけて、粗い対応付けから細かい対応付けにいたる3段階のエッジの対応付けの各段階で面の内挿を行い、計算の収束を早めることを試みている。しかしいずれの場合も、対応付けが完全に正しくなされたという仮定の上でのことであり、対応付けそのものの議論ではない。

著者の方法では対応付けと内挿を分けず、同時に行なっているところに特徴がある。可能なエッジの対応付けの組合わせに対して最も自然な曲面を内挿できるものを選び出す。Grimsonが自然な曲面として最も滑らかな曲面を考えたのに対し、われわれは偏差間を最も平坦に内挿するのがより自然であると考え。それはエッジ間にはエッジを作る陰影が生じない、すなわち起伏がなく、面はなるべく平坦に内挿されるべきであると考えからである。しかも現実の曲面はエッジの位置で曲面勾配の急激な変動が起こり得るにもかかわらず、滑らかな弾性板はこれを表現できないため適当でないと判断した。

最も平坦な曲面は物理的には針金の枠組みの間を石鹸膜で張った膜面(membrane)のモデルで表現できる。膜面はポテンシャルエネルギーを持ち、可能な偏差の組

合せ(すなわち境界条件)の中でポテンシャルエネルギーが最小になるものを最も自然な曲面であるとしている。

2. 節では一般的な曲面の内挿問題を概観する。全体的最適解を与える汎関数表現による定式化と有限差分法による解法を述べる。3. 節では最も平坦な曲面を与えるマッチング法を論じ、石鹸膜の内挿法が妥当であることを簡単なモデルで示す。4. 節では、この方法を大縮尺空中写真の画像に適用した結果を述べる。

2. 曲面の内挿とその汎関数表現^{6,7}

2. 1 内挿関数

偏差のマップを内挿する前に、一般的な曲面内挿の問題を考える。一般に xy 平面上の曲面 $u = u(x, y)$ を、与えられた点を通り、ある全体的最適条件を満たすように決定するにはなんらかの積分で表わされた汎関数を最小にすればよい。ただし一意解を保証するためには汎関数は凸でなければならない。すなわち後述するように、有限差分法で内挿曲面を求めるとき、内挿領域の格子標高を未知数として、汎関数を離散化する。このとき一意解を保証するには汎関数が未知数の二次形式になり、かつその係数行列が正定値にならねばならない。許される汎関数のうち物理的に重要なものを挙げると次のものがある。

$$e_1(u) = \frac{1}{2} \int (u_{xx}^2 + u_{yy}^2) dx dy \quad (1)$$

$$e_2(u) = \frac{1}{2} \int (u_{xx} + u_{yy})^2 dx dy \quad (2)$$

$$e_3(u) = \frac{1}{2} \int (u_{xx}^2 + 2u_{xy}^2 + u_{yy}^2) dx dy \quad (3)$$

$$e_4(u) = \frac{1}{2} \int u_{xy}^2 dx dy \quad (4)$$

$$e_5(u) = \frac{1}{2} \int (u_x^2 + u_y^2) dx dy \quad (5)$$

u_x, u_y が小さいとき、 x 方向、 y 方向の曲率が u_{xx}, u_{yy} で近似されることから、式(1)は曲率の二乗和の積分を最小化したものであり、式(3)の u_{xy} の項を省略した形になっている。これは滑らかな曲面を生成し数値地形モデルの内挿によく用いられる⁸。

式(2)、式(3)は、板の曲げのポテンシャルエネルギーの式に等しく、式(2)はボアソン比を1にしたとき、式(3)は0にした時に相当する。Grimsonは式(3)を使った。式(4)は捻りの項のみを考えたもの。

式(5)は勾配の二乗和を最小にするものであり、例えば金枠に石鹸膜を張った場合の膜面のポテンシャルエネルギーに相当する。式(4)、(5)は平坦な曲面を生成する。

2. 2 汎関数の違いによる内挿曲面の性質

汎関数の違いで内挿曲面がどう変わるかを見るため、図1に示す四角いケーキの内挿問題を考えよう。ケーキは2段であり、何の模様も付いていず(実験の便宜に xy 格子を入れてある)、斜め上から一様の光線で

照らされているとする。面の照度のみが異なっているとき、抽出されるエッジはケーキの稜線（枠）のみである（2段目のケーキが1段目に落とす影は考えないで置く）。そこで今なんらかの方法で枠部分の対応付けが正しくなされたとして、この枠の3次元座標を境界条件として与える。そして式(1)から(5)の汎関数を用いて、枠の間の曲面を内挿して連続した曲面を再構成する。格子の幅を1とし、格子の高さuを未知数として差分法で内挿を行なった。例えば e_3 を離散化すると次式になる。

$$e_3(u) \equiv U_3(v) = 1/2 \sum_i \sum_j (u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j})^2 + \sum_i \sum_j (u_{i+1,j+1} - u_{i+1,j} - u_{i,j+1} + u_{i,j})^2 + 1/2 \sum_i \sum_j (u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1})^2 \quad (6)$$

ここで

$$v^T = (u_{11} \dots u_{m1} \dots u_{12} \dots u_{m2} \dots u_{1n} \dots u_{mn}) \quad (7)$$

である。 $U_3(v)$ は二次形式

$$U_3(v) = v^T A^T A v \quad (8)$$

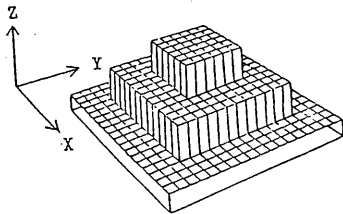
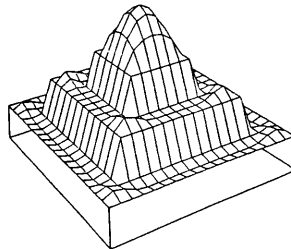
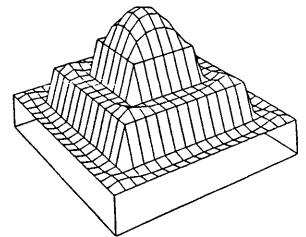


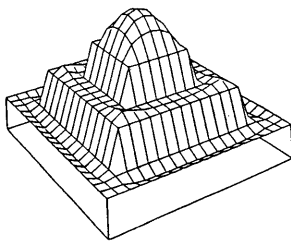
図2 実験モデル（ケーキ）



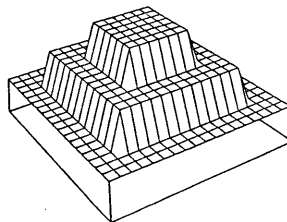
e_1



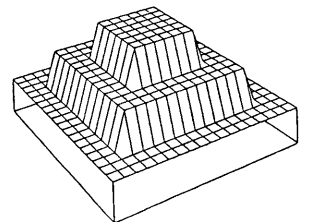
e_2



e_3



e_4



e_5

図2 5つの関数による内挿結果

になる。A係数行列である。

次に高さが与えられている格子点の条件を組み込む。この方法には2つあり、一つはLagrangeの乗数法を使うもの、他は大きな重みを使う方法である。実験には後者を使ったが、3節で述べるGreen関数を使うエッジの対応付けに前者の知識が必要になるので両方を説明する。

(1) Lagrange乗数法を用いる方法

高さの分かっている格子点の高さを c_{ij} として、その条件を

$$Bv = C \quad (9)$$

で表す。Cは c_{ij} を列ごとに並べたベクトル、Bは格子 ij に高さが与えられていれば、対応する要素に1、与えられていなければ0を与える行列である。すなわちBの各行には一つだけ1が入る。目的関数は一般に式(9)のもとで

$$U(v) = v^T A^T A v \rightarrow \min \quad (10)$$

となる v を求める形になり、Lagrangeの乗数を使う

と解は次式になる。

$$V = (A^T A)^{-1} B^T (B (A^T A)^{-1} B^T)^{-1} C \quad (11)$$

(2) 大きな重みを用いる場合

この方法はGauss-Seidel法のような繰り返し法で連立方程式を解き、解を求める場合に有効である。内挿面を、高さが与えられている格子点を正確に通すのではなく、ある程度の誤差を認めてその近傍を通すものである。このときの目的関数は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Phi &= 1/2 V^T A^T A V + 1/2 \beta \sum_{i,j} (u_{i,j} - c_{i,j})^2 \\ &= 1/2 V^T A^T A V + 1/2 (V - C)^T W (V - C) \rightarrow \min \quad (12) \end{aligned}$$

ここで β は高さの与えられている格子点の重みであって、 Σ はその格子点についての和である。 W は対角要素が0か β かの対角行列である。式(12)の解は次式になる。

$$V = [A^T A + W]^{-1} W C \quad (13)$$

解を確定するため境界の条件は用いる汎関数に含まれる次数によって変えなければならない。採用した条件は次のようである。

汎関数 e_1 から e_4 では、ケーキの正方形枠の境界で(境界を一般に $x=b$ で表わす)変位0、勾配0(固定端)とし、

$$(u)_{x=b} = 0, (\partial u / \partial (x, y))_{x=b} = 0 \quad (14)$$

とした。

汎関数 e_5 は境界で変位0として

$$(u)_{x=b} = 0 \quad (15)$$

を与えた。

e_1 から e_5 までの内挿問題をGauss-Seidel法で解いた結果を図2に示す。汎関数の形から容易に推定できるように、 e_1, e_2, e_3 は滑らかな曲面を再現するが、 e_4, e_5 は平坦な曲面となる。最初の3つには実質上の差はない様に思える。また e_4 は数学的に性質が悪く、格子の数を増やすと解が不安定になりがちであった。われわれの主旨から、 e_5 はこれらの中では最も好ましい内挿をすることが分かる。

3. 膜面のポテンシャルを最小にするエッジの対応付け
簡単のために図3の簡単な線画のステレオ画像を例にとって議論を進める。

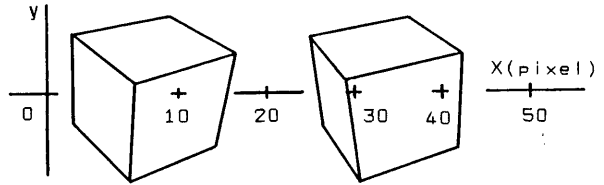


図3 立方体のステレオ図形

3. 1 基本的な考え方

われわれの方法でエッジの対応付けを行なう手続きは次の2つに分けられる。

(1) 偏差の可能な組合せを見いだす。組合せの数をできるだけ減らし、かつ正しい組合せを排除しないようにするのが目的である。

(2) その中から e_s を最小にする組合せを見つける。これらの基本的な手続きは以下のようである。

(1) 偏差候補の抽出—各々のエッジの偏差の候補は次の常識的な3つの条件を満たすものを取り上げる。
・ epipolar幾何を満たす。

・ エッジ勾配が左右画像でほぼ等しい。左右画像のエッジのなす角度の差の絶対値が 45° 以内とした。

・ 偏差の大きさを制限する。これは組合せの数を減らすとともに、隠れ部分(occlusion)からの誤った偏差候補を拾わないために採用した。但し図3については隠れ部分がないため制限しなかった。

(2) 最適な偏差の組合せの選択—ここでは変数 u は偏差の値を表わすことにするが、偏差の値と奥行きはほぼ線形関係にある。いま左画像でのエッジでの偏差の値 $V=C$ が確定したと仮定して、式(11)を式(10)に代入すると

$$U = 1/2 \cdot C^T (B (A^T A)^{-1} B^T)^{-1} C \quad (16)$$

を得る。式(16)は曲面の持つポテンシャルエネルギーであり偏差ベクトル C の組合せごとに異なった値を取るが、これを最小にする偏差ベクトル C の組合せが最も平坦な曲面を作るはずであり、正しい偏差の値を与えると期待する。

3. 2 グリーン関数を用いたポテンシャルの表現^{9,10)}

式(16)の $B (A^T A)^{-1} B^T$ は偏差の与えられるエッジの位置の分布で決まる行列である。行列 $(A^T A)$ は通常非常に大きいものになり、かつ前もって計算して置かなければならない。一方エッジの数は画像全体に比べて少数であり、行列 $B (A^T A)^{-1} B^T$ の次数はエッジの数に等しい。グリーン関数を使えばこの行列を直接求めることができ計算量を減らすことができる。それとともに内挿曲面についての物理的見通しがよくなる。

グリーン関数を使って偏差の内挿問題を解くため、

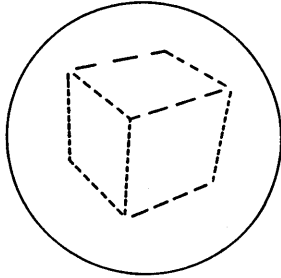


図4 膜面の変位と立体画像の偏差のアナロジ

それと等価な問題を考えよう。図4に示すように、半径 R の枠上に膜面を張り、この面に分布 $f(x, y)$ の力を加える。このため膜面が変位し、その関数を $u(x, y)$ で表わすことにする（膜の変位を偏差の値と同じ u で表わす）。

力 $f(x, y)$ を受ける膜面の変位は次の変分問題の解で与えられる。

$$E = 1/2 \iint (u_x^2 + u_y^2 - fu) dx dy \rightarrow \min \quad (17)$$

式(17)は次の微分方程式と同値である。

$$u_{xx} + u_{yy} = \nabla^2 u = -f(x, y) \quad (18)$$

半径 R の円周上で $u(x, y) = 0$ をとる境界条件のもとで、式(18)の直接解は次のようになる。

$$u(x, y) = \iint f(x, y) G(x, y, \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (19)$$

ここで $G(x, y, \xi, \eta)$ はグリーン関数であり、次の式で定義される¹⁾。

$$G(x, y, \xi, \eta) = -\frac{1}{2\pi} \ln r + \frac{1}{2\pi} \ln r' - \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{R}{\rho} \right) \quad (20)$$

$$x = \rho \cos \theta \quad \xi = \tilde{\rho} \cos \tilde{\theta}$$

$$y = \rho \sin \theta \quad \eta = \tilde{\rho} \sin \tilde{\theta}$$

$$r^2 = \tilde{\rho}^2 + \rho^2 - 2\rho\tilde{\rho} \cos(\theta - \tilde{\theta})$$

$$r'^2 = (R^2/\rho)^2 + \tilde{\rho}^2 - 2\tilde{\rho}(R^2/\rho) \cos(\tilde{\theta} - \theta)$$

式(20)を書き直すと次式になる。

$$G(x, y, \xi, \eta) = -\frac{1}{4\pi} \ln \left[\frac{((x-\xi)^2 + (y-\eta)^2)}{(R^2 + \frac{1}{R^2}(x^2 + y^2)(\xi^2 + \eta^2) - 2(x\xi + y\eta))} \right] \quad (20')$$

式(20')を式(5)に代入して整理すると次のようになる。

$$e_s = \iint \iint G(\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2) f(\xi_1, \eta_1) f(\xi_2, \eta_2) d\xi_1 d\eta_1 d\xi_2 d\eta_2 \quad (21)$$

である。

ここで連続な系を差分近似して離散座標系に変換する。全ての格子点での膜の変位を u_i で表わし、列ごとに並べてベクトル U とする。力の作用する格子点（偏差候補のあるエッジに相当する）に番号付けして、 $i=1, 2, 3, \dots, n$ とし、その点の力と変位を f_1, f_2, \dots, f_n および u_1, u_2, \dots, u_n で表わす。ベクトル F 、ベクトル C を

$$F^T = (f_1, f_2, \dots, f_n), \quad C^T = (u_1, u_2, \dots, u_n)$$

とすると、式(19)と式(21)は、それぞれ

$$C = H F \quad (19')$$

$$U = F^T H F = C^T H^{-1} C \quad (21')$$

と書ける。ここで H は力の作用点がある他の力の作用点に及ぼす影響のグリーン関数の行列である。すなわち格子点 i の座標を x_i, y_i とすると

$$H = (h_{ij}), \quad h_{ij} = G(x_i, y_i, x_j, y_j)$$

で定義される。式(21')は式(16)と等価であって、

$$H = B(A^T A)^{-1} B^T$$

である。

偏差の内挿の問題に戻れば両者の関係は次のようである。図4において、エッジの位置は上記の力の作用点に相当し、偏差の値は膜の変位に相当する。すなわち半径 R の円周上で偏差 0 とする条件で、式(21')を最小化しよう偏差の間を内挿する問題になる。偏差の候補の組合せについて式(21')を計算しその最小値を求める。

面全体の偏差の値は、式

$$u(x, y) = \sum_j G(x, y, x_j, y_j) f_j \quad (22)$$

で求めることができる。

式(20')のグリーン関数は $x=\xi, y=\eta$ で特異性を持つため、行列 H の対角項は無限大になる。実際の計算では H の逆行列の計算で H の非対角項が桁落ちを起こさない程度に大きな値を与える。

R は対応付ける画像の大きさに比べてかなり大きくとった方がよいと思われる。こうするとポテンシャルの値が画像の周辺部の偏差の分布に影響しにくくなり、

誤った対応付けで偶然ポテンシャルが小さくなる可能性が小さくなると推定される。

3. 3 簡単な画像による実験と考察

3. 1の(1)に従い、各々のエッジで偏差の候補を拾い出した。図4のエッジは64点しかないが、それでもすべての組合せについて式(21)を計算するのは現実的でない。そこで左画像上の連続エッジのある部

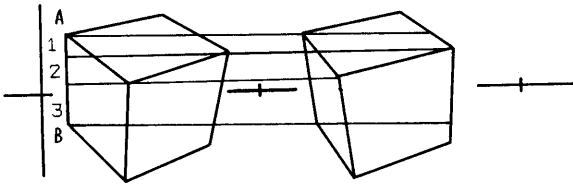


図5 連結エッジの分割

分について、対応するエッジの候補のリストを作ったとき、それらが左画像の共通の連続エッジに乗っている場合は、その中のただ一つの連続エッジと対応付けられるとした。例えば図5に示すように、線分ABを3つの部分に分割し、それぞれは同じ連続エッジと結びつくとする。

表1、表2に対応付けの結果を示した。候補偏差の値に0からのバイアスが大きく入った場合には、正しい偏差の組合せでポテンシャルが最小にならなかった(例えば図3をそのまま使った場合であって約11画素のバイアスがある)。これは図形周囲の膜のポテンシャルが図形部分のポテンシャルより大きくなるからである。

正しい偏差の組合せの場合、バイアスによってどの程度ポテンシャルが変わるかを表1に示した。同時に膜の半径の影響も示した。案外に半径の影響はなかったが、バイアスの影響は大きくこのことから正しい対応付けをするには画像全体の平均位置を合わせる必要があることがわかる。

さらに誤った対応付けを入れた場合のポテンシャルの値を表2に示した。完全にでたらめな対応付けでは、表2の条件で2~4程度の値をとった。表2には図6のように対応付けの誤りが1つある場合と2つある場合を示した。図6はエッジが誤って対応付けられた位置を表し、エッジ123が143と対応付けられたことを意味している。

4. 空中写真画像による実験と考察

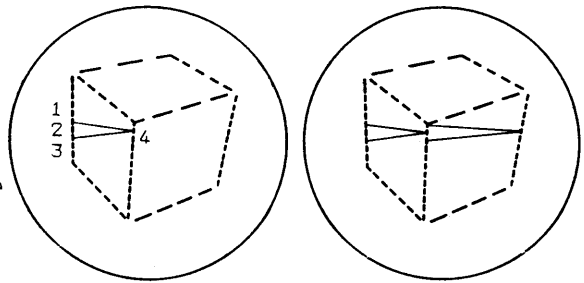
上記の方法を実際の空中写真画像に適用した例を示す。

表1 正しい組合せでの偏差のバイアスと膜の半径 R の影響

バイアス	R (画素)	ポテンシャル
0	20	0.18
0	100	0.18
0	10000	0.17
11	100	7.33
11	10000	7.10
22	10000	24.6

表2 誤った偏差を入れたときのポテンシャル (バイアス=0, R=10000)

正しい組合せ	図6 a	図6 b
0.17	0.18	0.26



a) 誤りが一つの時 b) 誤りが2つの時

図6 誤った偏差の図

図7は512x512画素のステレオ画像対で、マッチングにはいくつかの典型的な困難な点を含んでいる。すなわち、ビルによるオクルージョン、屋根のハレーション、堀の像が左右で極端に異なること、パーキングロットで同一パタンの繰り返しがあることである。画像はエビボーラ線に沿って再サンプリングして縦視差を除いてある。

3. 1節の(1)に述べた方法で偏差の候補を抽出した。偏差の範囲を制限するため、coarse-to-fine法を用いた。図8は、主波長 $\lambda = 16\pi, 8\pi$ のLOG (Laplacian of Gaussian) フィルタを通した画像から縦方向のエッジを抽出した画像である。

第一段階の対応付けでは、図8aを用いた。偏差の候補を取り出すときには、偏差の近似値が与えられないので偏差の値の範囲を制限しなかった。

取り出した偏差候補を調べたところ、その中には必ず正しい偏差が含まれていた。しかしこれは必ずしも

保証されない。現在のところ、このエッジの偏差候補を拾い出すときに、正しい偏差の入っていない候補の集合を拾い出したときには誤った対応を与えてしまう。地上の高さの偏差を0として、偏差のバイアスを消去した。これは相関法などをつかって自動に行なうこともできよう。

$R = 1024$ 画素として最小のポテンシャルを与えるエッジの偏差を決定した後で、式(22)によって画面全体の偏差を求めた。図9aはその値を左画像上に重ねた図である。明るいところほど小さい偏差の値(高い標高)を示している。マッチングの精度を確認したところ選びだした偏差は全て正しい値であった。しかし内挿された曲面は建物の形を丸くし、2つの建物をつなげ、しかも中央がたるんでいる。これはそれぞれ次の理由による。

(1) 曲面内挿式(22)を使うと、桁落ちが大きくなり、正しい膜面内挿にならない。

(2) 2つの建物の間には対応付けられるエッジが無いため両方の高さがつながった。

(3) 横のエッジの拘束が無いため、膜面が y 方向に引っ張られて中央がたるむ。

(3)から、面の内挿には横方向のエッジも必要だといえよう。また、(1)に対しては式(22)によるよりも実用上もっと直接的かつ簡単な内挿法が好ましい。

次に第一段階で得られた偏差の分布を初期値として図8bのマッチングを行なった。マッチングの手続きは第一段階と同じであるが、偏差の探索範囲は第一段階で与えられた偏差の周り ± 3 画素とした。図9bはマッチングの結果を示している。マッチングで得られた偏差の値は○印を除いて全て正しかった。○印の部分は影による雑音エッジを拾ったためである。

5. 結論

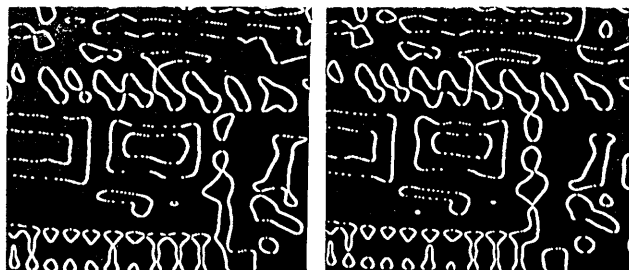
この論文では、対象の曲面を膜面で内挿して、その歪ポテンシャルを最小にするという考えに基づくステレオ画像の対応付けの方法を提案した。簡単な対象の内挿問題で膜面の内挿が好ましい結果を与えることを示し、次に膜面のポテンシャルを計算する式を、Green関数を用いて導いた。これを用いて正6面体のステレオ図形の対応付けを行い、ここで述べた方法が正しいマッチングを実行することを例証した。最後に現実の大縮尺空中写真画像にこれを適用して、エッジの対応付けと曲面の内挿精度について報告していくつかの問題点を述べた。

文献

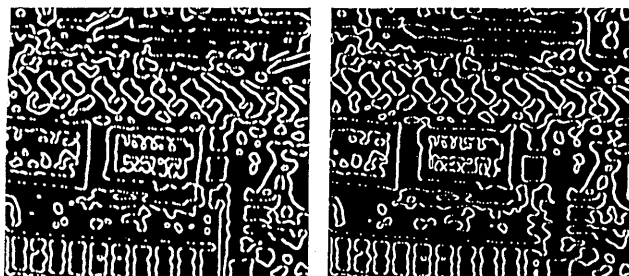
1. 服部 進; 計算機によるステレオマッチングと自動相関機の現況、写真測量とリモートセンシング、Vol. 25, NO. 1, pp. 17-28, 1986
2. 横矢直和; ステレオ対応問題の正則化による曲面再構成、情報処理学会第39回全国大会, pp. 438-439, 1989
3. Grimson, W.E.L.; An Implementation of a Computational Theory of Visual Surface Interpolation, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol 22, 1983, pp. 39-69.
4. Marr, D. and T. Poggio; A theory of Human Stereo Vision, A. I. Memo, No. 451, MIT, 1977
5. Terzopoulos, D; Multi-level Reconstruction of Visual Surfaces--Variational Principles and Finite Element Representations, A. I. Memo, No. 671, MIT, 1982
6. 海野 展靖; ステレオマッチングにおける多段階内挿法の実験的検討、岡山大学大学院工学研究科修士論文、1987
7. 海野 展靖、服部 進、他; 汎関数の違いによる内挿曲面の形状の比較、日本写真測量学会昭和61年度年次学術講演会発表論文集、pp. 103-188
8. Ebner, H., P. Reiss; Height Interpolation by The Method of Finite Elements, International Society for Photogrammetry--Commision III Symposium, Moscow, 1978, pp. 79-94
9. 服部 進、大谷 仁志; 膜の歪エネルギー最小によるステレオマッチング、日本写真測量学会昭和63年度年次学術講演会発表論文集、pp. 91-98
10. Hattori, S. and H. Ohtani; A Stereo Matching Method Using the Green's Function, IAPR Workshop on CV -Special Hardware and Industrial Applications, pp. 54-56, Oct. 12-14, Tokyo
11. Greenberg, M.D.; Application of Green's Functions in Science and Engineering, pp. 71-92, Prentice Hall, New Jersey, 1971



図7 ステレオ空中写真 (512 x 512 画素)

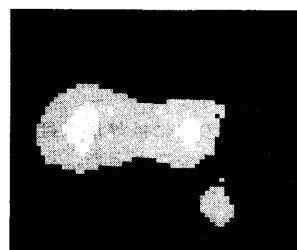


(a) 第1段階



(b) 第2段階

図8 LOG フィルタで抽出したエッジ画像



(a) 第1段階



(b) 第2段階

図9 エッジ間を内挿した連続の偏差図