

テクスチャによる面の三次元復元

山田和幸

金谷健一

群馬大学工学部情報工学科

KanataniとChouの理論に基づき、テクスチャ要素が一様に分布しているという仮定の下で、テクスチャ画像からの対象物の3次元復元を行う方法を実験で確かめた。この方法では”テクスチャの構造”にはよらず、テクスチャの統計的性質から計算できることが特徴である。まず、点や線分の要素からなる離散なテクスチャの”一様性”を抽象的に定義する。次に中心射影によって観測されるテクスチャ密度の歪みの解析を、画像座標系について表現した微分幾何学の”第一基本形式”によって記述する。この結果に基づいて、テクスチャ画像を”試験関数”によって数値化したものを画像の”特徴量”とする。そして、面積分の値と画像の特徴量の”食い違い”から、表面の形を決定する基本方程式を導く。さらに、この基本方程式を線形近似とNewton - Raphson反復法を用いて数値的に解く方法を提案する。さらに、計算機実験と実際の写真からの計算例を示す。

3D RECOVERY OF SURFACE SHAPE FROM TEXTURE

Kazuyuki Yamada and Ken-ichi Kanatani

Department of Computer Science
Gunma University, Kiryu, Gunma 376, Japan

The 3D shape of a textured surface is recovered from its perspective projection image on the assumption that the texture is homogeneously distributed. First, following the theory of Kanatani and Chou, the "homogeneity" of a discrete texture is defined in precise mathematical terms. Then, the relationship between the surface texture density and the observed texture density on its image is described in terms of the "first fundamental form", and a general 3D recovery formulation is given in terms of "features" or "observables" which are macroscopic quantities. Hence, there is no need to identify the "regularity structure" of the texture or individual texture elements. Some numerical schemes and numerical examples are also given.

1. 序論

人間は物体の表面の模様を見て奥行きを感じる。物体の形状や奥行き、質感などを感じるのに必要な手がかりとなるような繰り返しの表面の模様を”テクスチャ”と言う。コンピュータビジョンの重要な問題の一つに『テクスチャからの3次元復元問題』がある。これは知覚心理学の方面からも関心を持たれている問題である(Gibson[3])。人間が奥行きを感じるのは、点が規則的に並んでいる、直線が等間隔に直交している、テクスチャの原型の変形していることなどからであろう。しかし、この様な考えに基づいて計算機で直接実行するには、点や線分の規則性、すなわち”テクスチャの構造”を認識しなければならない。これを試みる研究もあるが[8, 9, 10]、計算機では扱にくい。したがってテクスチャの構造に着目するより、”テクスチャ”の分布に着目した方が扱いやすくなる。Witkin[11]はテクスチャの線要素があらゆる方向に等しい割合で分布しているという”等方性”の仮定から面の傾きを求め、Kanatani[4]はこれを数学的に体系化し、積分幾何学(ステレオジー)を適用した。一方、AloimonosとSwain[1]は”一様性”の仮定から面の形状を求めた。これらは人間の視覚での認識の仕方と違うかもしれないが、コンピュータビジョンの立場からは必ずしも人間と同じ方法で視覚認識を行うことはない。

そこで、本論文ではKanataniとChouの理論[5, 6]に基づき、テクスチャ要素が一様に分布しているという仮定の下で、テクスチャ画像からの対象物の3次元復元を行う方法を実験で確かめた。この方法では”テクスチャの構造”にはよらず、テクスチャの統計的性質から計算できることが特徴である。

本論文ではまず、点や線分の要素からなる離散なテクスチャの”一様性”を抽象的に定義する。次に中心射影によって観測されるテクスチャ密度の歪みの解析を、画像座標系について表現した微分幾何学の”第一基本形式”[7]によって記述する。この結果に基づいて、テクスチャ画像を”試験関数”によって数値化したものを画像の”特徴量”とする。そして、面積分の値と画像の特徴量の”食い違い”から、表面の形を決定する基本方程式を導く。

さらに、この基本方程式を線形近似とNewton - Raphson反復法を用いて数値的に解く方法を提案する。さらに、計算機実験と実際の写真からの計算例を示す。

2. テクスチャ密度と一様性

テクスチャ画像上にある領域(ウィンドウと呼ぶ)Wを

固定し、ウィンドウW上の点要素テクスチャのテクスチャ密度 $f(x,y)$ を次のように抽象的に定義する。

定義2.1(点密度) ウィンドウW上の点要素テクスチャのテクスチャ密度 $f(x,y)$ に試験関数 $m(x,y)$ を掛けて面積分したものが次のようになると定義する。

$$\int_W f(x,y)m(x,y)dx dy = \sum_{P_i \in W} m(x_i, y_i) \quad (2.1)$$

ここで、 $P_i(x_i, y_i)$ はウィンドウW上の点要素テクスチャ要素である。

線分要素テクスチャのテクスチャ密度も次のように定義する。

定義2.2(線分密度) ウィンドウW上の線分要素テクスチャのテクスチャ密度 $f(x,y)$ に試験関数 $m(x,y)$ を掛けて面積分したものが次のようになると定義する。

$$\int_W f(x,y)m(x,y)dx dy = \sum_{L_i \subset W} \int_{L_i} m(x,y)\sqrt{dx^2+dy^2} \quad (2.2)$$

ここで、 L_i はウィンドウW上の線分である。

次に、テクスチャ密度の一様性を定義する。 $f(x,y)$ を前の定義2.1, 2.2で定義したテクスチャ密度とする。 $f(x,y) \approx c$ のときテクスチャは一様であるとしたいが、テクスチャ密度を抽象的に定義しているので次の意味で解釈することにする。

定義2.3(一様性) c を試験関数 $m(x,y)$ に独立な定数とするとき、

$$\int_W f(x,y)m(x,y)dx dy \approx c \int_W m(x,y)dx dy \quad (2.3)$$

が成り立つときテクスチャ密度 $f(x,y)$ は一様性を持つと定義する。

定数 c は、単位面積当りの点の個数や、単位面積当りの線分の長さという直観的な意味でテクスチャ密度として解釈できる。式(2.1)と(2.2)の定義から次のことが言える。

定義2.4(試験関数と一様性) テクスチャ密度が一様であるとき、次の近似が成り立つ。

$$\int_W m(x,y)dx dy = \begin{cases} \frac{1}{c} \sum_{P_i \in W} m(x_i, y_i) & (\text{点要素テクスチャ}) \\ c & (\text{線分要素テクスチャ}) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\left\{ \frac{1}{c} \sum_{L_i \subset W} \int_{L_i} m(x,y) \sqrt{dx^2+dy^2} \right\} \text{(線分要素テクスチャ)}$$

式(2.4)は試験関数 $m(x,y)$ の積分のモンテ・カルロシミュレーションと見ることが出来る。そして $1/c$ は一点当りの面積、または線分の単位長さ当りの面積とみることが出来る。テクスチャ要素についての積分がモンテ・カルロシミュレーションの良い近似となるときのテクスチャが一様だと定義したことに相当する。

注意 試験関数 $m_S(x,y)$ を次のような領域 S の関数と選ぶ。

$$\begin{aligned} m_S(x,y) &= 1 \quad (x,y) \in S \\ &= 0 \quad \text{その他} \end{aligned} \quad (2.5)$$

このときの一様性は、領域 S 内の点の数や線分の長さは領域 S の面積にほぼ比例することと言える。定数 c は単位面積あたりの領域 S 内のテクスチャ要素の数や長さとして解釈する。AloimonosとSwain[1]は一様性をこの試験関数で定義していることに相当する。

ここではテクスチャ上の積分を式(2.1),(2.2)で抽象的に定義したので積分の変数の変更を行うときは注意しなければならない。通常の規則は適用できない。そこで次のように考える。二つの滑らかな関数 $u(x,y), v(x,y)$ を考え、 $x(u,v), y(u,v)$ をその逆関数とする。 u,v を新しい座標として使い、 xy 平面上のウィンドウ W に対応する uv 平面の領域を W' とする。変換されたテクスチャ密度 $\tilde{f}(u,v)$ も同様に次のように抽象的に定義する。

$$\int_{W'} \tilde{f}(u,v) \tilde{m}(u,v) du dv = \int_W f(x,y) m(x,y) dx dy \quad (2.6)$$

ここで関数 $\tilde{m}(u,v)$ は $\tilde{m}(u,v) \equiv m(x(u,v), y(u,v))$ と定義する。

まず点要素テクスチャについて考える。 uv 平面上の点 $P_i(u_i, v_i)$ を xy 平面上の点 P_i の像とすると次のようになる。

$$\begin{aligned} \int_W f(x,y) m(x,y) dx dy &= \sum_{P_i \in W} m(x_i, y_i) \\ &= \sum_{P_i \in W'} m(x(u_i, v_i), y(u_i, v_i)) = \sum_{P_i \in W'} \tilde{m}(u_i, v_i) \end{aligned} \quad (2.7)$$

次に線分要素テクスチャについて考える。 uv 平面上の線分 L_i が xy 平面上の線分 L_i に対応するものとするとき次のようになる。

$$\int_W f(x,y) m(x,y) dx dy = \sum_{L_i \subset W} \int_{L_i} m(x,y) \sqrt{dx^2+dy^2}$$

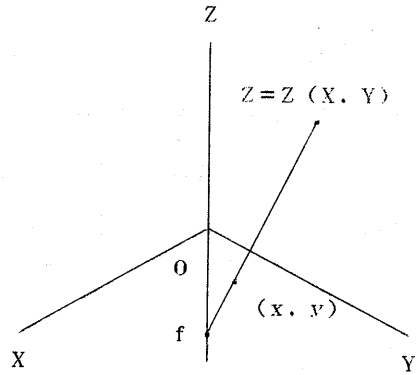


図1 中心射影と画像面との関係

$$\begin{aligned} &= \sum_{L_i \subset W} \int_{L_i} m(x(u,v), y(u,v)) \times \\ &\quad \sqrt{(x_u^2+y_u^2)du^2+2(x_u x_v+y_u y_v)du dv+(x_v^2+y_v^2)dv^2} \\ &= \sum_{L_i \subset W} \int_{L_i} \tilde{m}(u,v) \Gamma(u,v) \sqrt{du^2+dv^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ただし

$$\Gamma(u,v) \equiv \frac{\sqrt{(x_u^2+y_u^2)x^2+2(x_u x_v+y_u y_v)xy+(x_v^2+y_v^2)y^2}}{\sqrt{u^2+v^2}} \quad (2.9)$$

ここで、

$$\begin{aligned} x_u &= \partial x(u,v) / \partial u, \quad x_v = \partial x(u,v) / \partial v, \\ y_u &= \partial y(u,v) / \partial u, \quad y_v = \partial y(u,v) / \partial v, \\ \dot{u} &= du(t)/dt, \quad \dot{v} = dv(t)/dt \end{aligned}$$

とおいた。ただし、 t は線分に沿う任意のパラメータである。

3. 第一基本形式

3次元空間に xyz 座標系を考える。 z 軸をカメラの光軸とし、 xy 平面から距離 f の z 軸上の点 $(0, 0, -f)$ をカメラの中心とし、中心射影によって3次元物体の座標点 (X, Y, Z) を射影した xy 平面の座標点 (x, y) は次のようになる。(図1)

$$x = \frac{fX}{f+Z}, \quad y = \frac{fY}{f+Z} \quad (3.1)$$

物体面の方程式を $Z=Z(X,Y)$ とし、物体面と画像面との座標点の一対一対応を $X=X(x,y), Y=Y(x,y)$ とする。物体面に沿った微小変化を dX, dY, dZ とし、式(3.1)の両辺の微小変化をとれば、

$$fdX-xdZ=(f+Z)dx, fdY-ydZ=(f+Z)dy. \quad (3.2)$$

となる。また $Z=Z(X,Y)$ の両辺の微小変化をとれば、

$$dZ=PdX+QdY \quad (P \equiv \partial Z/\partial X, Q \equiv \partial Z/\partial Y). \quad (3.3)$$

となり、式(3.2),(3.3)を dX, dY, dZ についての線形連立方程式とみることができる。この解は次の形で得られる。

$$\begin{aligned} dX &= \frac{f+Z}{f(f-PX-QY)} [(f-QY)dx+Qxdy], \\ dY &= \frac{f+Z}{f(f-PX-QY)} [Pydx+(f-PX)dy], \\ dZ &= \frac{f+Z}{f-PX-QY} [Pdx+Qdy]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

画像面上に微小に離れた2点 $(x,y), (x+dx, y+dy)$ を考える。物体面の対応する点の3次元の距離を ds とする。 $ds^2=dX^2+dY^2+dZ^2$ より式(3.4)を代入すると、

命題3.1(第一基本形式)

$$ds^2 = \sum_{i,j=1}^2 g_{ij} dx_i dx_j \quad (3.6)$$

ただし $x_1=x, x_2=y$ 、及び次のようにおいた。

$$\begin{aligned} g_{11}(x,y) &= \frac{(1+Z/f)^2}{(1-(PX+QY)/f)^2} [(1+P^2)-2QY/f+(P^2+Q^2)y^2/f^2], \\ g_{12}(x,y) &= \frac{(1+Z/f)^2}{(1-(PX+QY)/f)^2} [PQ+(QX+PY)/f-(P^2+Q^2)xy/f^2], \\ g_{22}(x,y) &= \frac{(1+Z/f)^2}{(1-(PX+QY)/f)^2} [(1+Q^2)-2PX/f+(P^2+Q^2)x^2/f^2]. \end{aligned} \quad (3.7)$$

また、 $g_{12}(x,y)=g_{21}(x,y)$ である。

式(3.6)は画像座標で表した物体面の第一基本形式である。これによって物体面の3次元の性質を表す計算をすることが出来る[7]。例えば、画像面上に $(x,y), (x+dx,y), (x,y+dy), (x+dx,y+dy)$ の4点で定義した微小長方形を考える。このとき、画像面上での面積は $dx dy$ で物体面の対応する真の面積は $\sqrt{\det(g)} dx dy$ となり、式(3.7)より次の結果を得る。

$$\sqrt{\det(g)} = \frac{1+P^2+Q^2(1+Z/f)^2}{1-(PX+QY)/f}. \quad (3.8)$$

物体面を方程式 $Z=PX+QY+r$ で与えられる平面の場合を考え、式(3.1)を X, Y について解くと、

$$X = \frac{(f+r)x}{f-PX-QY}, Y = \frac{(f+r)y}{f-PX-QY}, Z = \frac{f(PX+QY+r)}{f-PX-QY}. \quad (3.9)$$

となり、式(3.5),(3.6)は次のようになる。 $(g_{12}(x,y)=g_{21}(x,y))$ である。

$$\begin{aligned} g_{11}(x,y) &= \frac{(1+r/f)^2}{(1-(px+qy)/f)^4} [(1+p^2)-2qy/f+(p^2+q^2)y^2/f^2], \\ g_{12}(x,y) &= \frac{(1+r/f)^2}{(1-(px+qy)/f)^4} [pq+(qx+py)/f-(p^2+q^2)xy/f^2], \\ g_{22}(x,y) &= \frac{(1+r/f)^2}{(1-(px+qy)/f)^4} [(1+q^2)-2px/f+(p^2+q^2)x^2/f^2]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\sqrt{\det(g)} = \frac{1+p^2+q^2(1+r/f)^2}{(1-(px+qy)/f)^3}. \quad (3.11)$$

4. 面の傾きの復元の原理

物体面上の曲面座標系 u,v を考え、画像座標 x,y との一対一対応が $u=u(x,y), v=v(x,y)$ 及びその逆 $x=x(u,v), y=y(u,v)$ によって与えられているとする。画像面上のウィンドウ W に対応する物体面の領域を W_0 とする。また、 $f_0(u,v)$ を物体面で定義した一様なテクスチャ密度とすると、試験関数 $m_0(x,y)$ に対して、一様性の仮定より、

$$\int_{W_0} f_0(x,y) m_0(x,y) dS_0 \approx c \int_{W_0} m_0(u,v) dS_0, \quad (4.1)$$

である。ここで dS_0 は物体面の面積素である。

式(4.1)は第一基本形式により画像座標 x, y で表現できる。右辺は通常の積分であるので、 $dS_0 = \sqrt{\det(g)} dx dy$ となり、

$$c \int_{W_0} m_0(u,v) dS_0 = c \int_W m(x,y) \sqrt{\det(g)} dx dy, \quad (4.2)$$

となる。ただし、 $m(x,y)=m_0(u(x,y), v(x,y))$ とおいた。

一方、式(4.1)の左辺の変換は、テクスチャが点要素からなるか、線分要素からなるかによって扱いが異なる。

点要素テクスチャのとき、式(2.7)より

$$\sum_{P_i \in W} m(x_i, y_i) = \int_W f(x, y) m(x, y) dx dy \quad (4.3)$$

である。

線分要素テクスチャのとき、式(2.8)より、

$$\sum_{L_i \subset W} \int_{L_i} m(x, y) \Gamma(x, y) \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (4.4)$$

である。ここで、

$$\Gamma(x, y) \equiv \frac{\sqrt{g_{11}\dot{x}^2 + 2g_{12}\dot{x}\dot{y} + g_{22}\dot{y}^2}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (4.5)$$

は (x, y) での線分方向による拡大比である。

ここで、次の近似を採用する。

$$\Gamma(x, y) \approx (\sqrt{\det(g)})^{1/2} \quad (4.6)$$

この近似を採用したことは、線分がほとんど等質的(等方的)に分布しているならば、面積が $\sqrt{\det(g)}$ 倍大きくなるとき、個々の線分はおよそ $\sqrt{\det(g)}^{1/2}$ 倍長くなる と解釈できる。

このとき、 $m(x, y)\Gamma(x, y)$ を新しい $m(x, y)$ とみなすことで、点要素テクスチャと線分要素テクスチャを同じ方法で扱うことができる。従って、ウィンドウ W 上の試験関数 $m(x, y)$ での積分

$$J = \int_W f(x, y) m(x, y) dx dy \quad (4.7)$$

を計算する。これをテクスチャの”特徴量”と呼ぶことにする。テクスチャが一様であれば

$$J \approx c \int_W f(x, y) (\sqrt{\det(g)})^{\kappa} dx dy \quad (4.8)$$

が成り立つ。ここで点要素テクスチャのとき $\kappa=1$ 、線分要素テクスチャのとき $\kappa=1/2$ である。

式(4.8)は次のように解釈できる。画像面上に小領域 S を考え、 S_0 を物体面の対応する領域とする。点要素テクスチャの場合、 S の面積は S_0 の面積の $1/\sqrt{\det(g)}$ 倍であるが、 S 中の点の個数は S_0 中の点の個数と等しい。したがって S 中のテクスチャ密度は S_0 中のテクスチャ密度の $\sqrt{\det(g)}$ 倍となる。線分要素テクスチャの場合、真のテクスチャがほぼ等方的ならば、 S 中の線分の全長は近似的に S_0 の全長の $1/(\sqrt{\det(g)})^{1/2}$ 倍である。 S の面積は、 S_0 の面積の $1/\sqrt{\det(g)}$ 倍であるので、 S 中のテクスチャ密度は S_0 中のテクスチャ密度の $(\sqrt{\det(g)})^{1/2}$ 倍となる。

3次元復元の原理は次のようになる。まず、物体面を

パラメータによってモデル化する(例えば、平面、二次曲面)。このとき、式(4.8)の右辺は未知のパラメータを含んでいる。次に、試験関数 $m_0(x, y)$ 、 $m_1(x, y)$ 、 $m_2(x, y)$ 、… を適当に用意する。これに対応する特徴量 J_0 、 J_1 、 J_2 、… を画像面上の和か積分の形で計算する。この結果、パラメータの値を決定するために必要な数の式が、式(4.8)の形で得られる。

5. 平面の傾きの復元

特に平面 $Z=pX+qY+r$ の場合を考えると、式(4.2)を等式とみなして、

$$J = c(\sqrt{1+p^2+q^2})^{\kappa} (1+\frac{r}{f})^{2\kappa} \int \frac{m(x, y) dx dy}{W(1-(px+qy)/f)^{3\kappa}} \quad (5.1)$$

を得る。

ここで試験関数 $m_0(x, y)$ 、 $m_1(x, y)$ 、 $m_2(x, y)$ を用意し、 J_i 、 $i=0,1,2$ を対応する特徴量とする。比 J_1/J_0 、 J_2/J_0 を取って共通因子 $c(\sqrt{1+p^2+q^2})^{\kappa} (1+\frac{r}{f})^{2\kappa}$ を消去すると次の方程式を得る。

命題4.1(基本方程式) 平面の傾き (p, q) は次の方程式を解くことで決定できる。

$$\int \frac{m_i(x, y) - (J_i/J_0)m_0(x, y)}{(1-(px+qy)/f)^{3\kappa}} dx dy = 0, \quad i=1,2 \quad (5.2)$$

ここで、基本方程式の線型近似を考える。カメラの焦点距離 f に比べて物体面の傾き (p, q) が零に近いとする。つまり、ウィンドウ W で $px+qy \ll f$ であると仮定する。このとき、次の式の原点回りのテイラー展開が導かれる。

$$\frac{1}{(1-(px+qy)/f)^{3\kappa}} = 1 + \frac{3\kappa}{f}(px+qy) + \dots \quad (5.3)$$

そこで $i=0,1,2$ について

$$\begin{aligned} L_i &= \int_W m_i(x, y) dx dy, \quad M_i = \int_W x m_i(x, y) dx dy, \\ N_i &= \int_W y m_i(x, y) dx dy. \end{aligned} \quad (5.4)$$

とにおいて、高次の項を無視すると、基本方程式(4.3)は次の p, q についての線形連立方程式になる。

$$\begin{bmatrix} M_1 - (J_1/J_0)M_0 & N_1 - (J_1/J_0)N_0 \\ M_2 - (J_2/J_0)M_0 & N_2 - (J_2/J_0)N_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

$$= \frac{f}{3\kappa} \begin{bmatrix} L_1 - (J_1/J_0)L_0 \\ L_2 - (J_2/J_0)L_0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

試験関数を

$$m_0(x,y)=1, m_1(x,y)=x, m_2(x,y)=y. \quad (5.6)$$

とすると、 $J_1/J_0, J_2/J_0$ はウィンドウW内のテクスチャの重心となる。ここでウィンドウWを $-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b$ となる長方形とすると、式(4.13)は

$$p = f\bar{x}/\kappa a^2, q = f\bar{y}/\kappa b^2. \quad (5.7)$$

となる。ここで (\bar{x}, \bar{y}) はウィンドウW内のテクスチャの重心である。 $(p, q) = (0, 0)$ のとき、つまり視線が物体面と直交しているとき、テクスチャの重心は原点に一致する。テクスチャの重心の”ずれ”の方向と大きさが物体面の傾き (p, q) となる。

前では傾きが零に近いと仮定したが、傾きが大きいときは次のように考える。 (\bar{p}, \bar{q}) を初期の推定値とする。等式(5.3)を (p, q) について (\bar{p}, \bar{q}) 回りのテイラー展開を行うと、

$$\frac{1}{(1 - (px + qy)/f)^{3\kappa}} = L(x,y) + M(x,y) \delta p + N(x,y) \delta q + \dots \quad (5.8)$$

となる。ここで、 $\delta p = p - \bar{p}, \delta q = q - \bar{q}$ かつ

$$\begin{aligned} L(x,y) &= \frac{1}{(1 - (\bar{p}x + \bar{q}y)/f)^{3\kappa}}, \\ M(x,y) &= \frac{3\kappa x}{f(1 - (\bar{p}x + \bar{q}y)/f)^{3\kappa+1}}, \\ N(x,y) &= \frac{3\kappa y}{f(1 - (\bar{p}x + \bar{q}y)/f)^{3\kappa+1}}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

である。このとき基本方程式(5.2)は

$$\begin{bmatrix} M_1 - (J_1/J_0)M_0 & N_1 - (J_1/J_0)N_0 \\ M_2 - (J_2/J_0)M_0 & N_2 - (J_2/J_0)N_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p \\ \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - (J_1/J_0)L_0 \\ L_2 - (J_2/J_0)L_0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

である。ただし次のようにおいた。

$$L_i = \int_W m_i(x,y) L(x,y) dx dy,$$

$$M_i = \int_W m_i(x,y) M(x,y) dx dy,$$

$$N_i = \int_W m_i(x,y) N(x,y) dx dy. \quad (5.11)$$

この結果、 $p' = \bar{p} + \delta p, q' = \bar{q} + \delta q$ が改良された推定値となる。この過程を $\bar{p} \leftarrow p', \bar{q} \leftarrow q'$ とし、収束するまで反復する。この方法は基本方程式の本質的なNewton-Raphson反復法である。KanataniとChou[5, 6]はカメラ回転による画像の射影変換を利用した反復法も提案している。

6. 実験結果

計算機実験での計算結果を図2-5に示す。ここで、真のテクスチャの面の傾き p, q を $(1.500, 0.866)$ 、試験関数 $m_0(x,y)=1, m_1(x,y)=x, m_2(x,y)=y$ とする。また焦点距離 $f=1.0$ とし、ウィンドウは $-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b$ となる長方形とし、ウィンドウサイズ $a, b = \tan(10^\circ) = 0.176$ とする。

図6, 7はタイル張りの床と壁の写真に対して計算を行ったものである。テクスチャが平行線からなっていることを既知とすれば、消失線を求めて傾きを知ることが出来る(図8)。しかし、画像上での直線が互いに平行に近いときは消失線の計算の誤差が大きくなり、信頼できない。それに対して、本方法はテクスチャ全体の分布から計算している。

7. 考察

この方法ではテクスチャ密度が極めて粗の場合でも適用することができるが、テクスチャ要素の数が増えるほど良い結果となる。傾きの推定値の収束は急速で4-5回の反復でよい。点要素テクスチャの方が線分要素テクスチャの場合より良い結果となる。また規則的に並んだテクスチャの方がランダムに並んだテクスチャの場合より良い結果となる。

本方法ではテクスチャの構造(平行性など)によらず、テクスチャの一様性の仮定からのみ物体の形状を求めている。これはテクスチャ画像の全体の特徴を考えているためである。

ここでは物体面が平面の時を考えたが、KanataniとChou[5, 6]は同じ考え方を曲面について適用している。実際問題の応用について考えるとき、どれがテクスチャ要素か、光の明暗に起因するノイズ(”偽のテクスチャ”)かを正しく認識することが必要となる。これについては、BlosteinとAhuja[2]がいろいろな試みをしている。

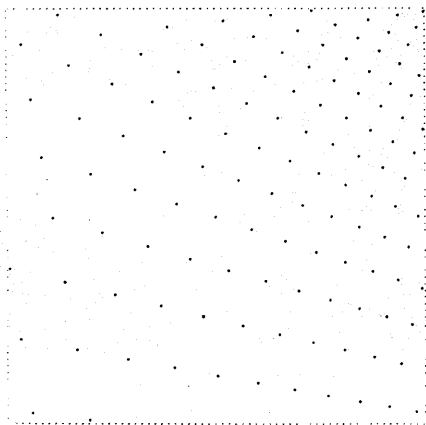


図2 規則的に並んだ点要素テクスチャ

傾きの推定値 (p,q):

1: (1.519, 0.979)

2: (1.468, 0.895)

3: (1.466, 0.892)

4: (1.466, 0.892)

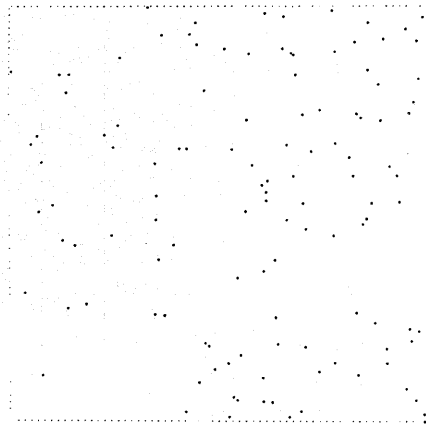


図3 不規則的に並んだ点要素テクスチャ

傾きの推定値 (p,q):

1: (1.181, 0.736)

2: (1.156, 0.695)

3: (1.156, 0.695)

4: (1.156, 0.695)

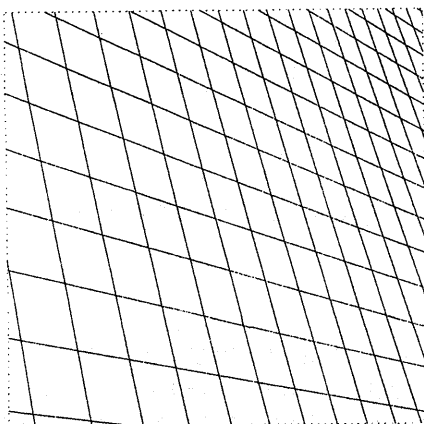


図4 規則的に並んだ線分要素テクスチャ

傾きの推定値 (p,q):

1: (1.997, 1.741)

2: (1.821, 1.563)

3: (1.804, 1.545)

4: (1.804, 1.545)

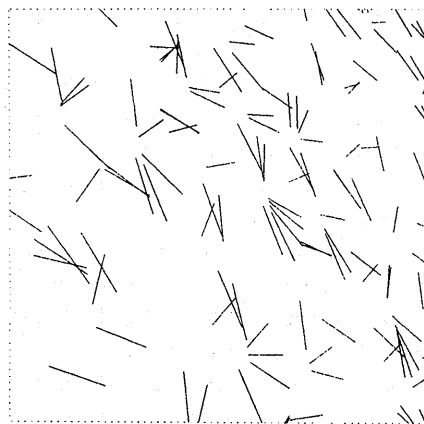


図5 不規則的に並んだ線分要素テクスチャ

傾きの推定値 (p,q):

1: (0.655, 1.014)

2: (0.636, 0.995)

3: (0.636, 0.995)

4: (0.636, 0.995)

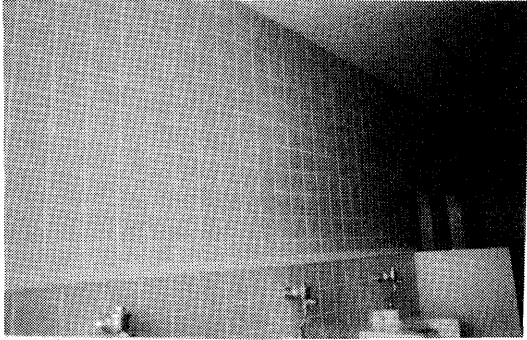


図6 群馬大学工学部情報棟玄関タイルの計算例.

傾きの推定値 (p,q):

- 1: (0.327, 1.661)
- 2: (0.360, 1.898)
- 3: (0.360, 1.898)
- 4: (0.360, 1.898)

消失線を用いた方法で面の傾きを求めると、
(-0.104, 2.473)となる。

参考文献

- [1]J. Aloimonos and M. J. Swain, Shape from texture. Proc. 9th Int. Joint. Conf. Artif. Intell.. Los Angeles, August 1985, pp. 926 - 931.
- [2]D. Blostein and N. Ahuja, Representation and three-dimensional interpretation of image texture: An integrated approach. Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, June 1987, London, pp. 444 - 449.
- [3]J. Gibson (1979). The Ecological Approach to Visual Perception. Houghton Mifflin, Boston, MA (古崎隆司, 古崎愛子, 辻敬一郎, 村瀬晃 共著 (1985), 生態学視覚論, サイエンス社).
- [4]K. Kanatani (1984). Detection of surface orientation and motion from texture by a stereological technique. Artificial Intelligence, 23: 213 - 237.
- [5]K. Kanatani and T.-C. Chou (1986a). Shape from texture: General principle. Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, June 1986, pp. 578 - 583.
- [6]K. Kanatani and T.-C. Chou (1986b). Shape from texture: General principle. 第17回 画像工学コンファレンス論文集, December, 1986, pp. 129 -



図7 壁タイルの写真からの計算例.

傾きの推定値 (p,q):

- 1: (-0.890, 0.462)
- 2: (-1.086, 0.561)
- 3: (-1.091, 0.562)
- 4: (-1.091, 0.562)

消失線を用いた方法で面の傾きを求めると、
(-1.148, 0.280)となる。

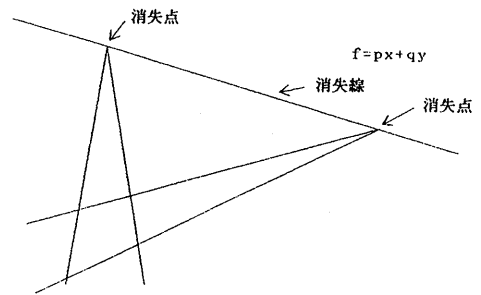


図8 消失線と平面の傾きの関係

132.

- [7]窪田忠彦, 微分幾何学, 岩波全書, 1957.
- [8]松山隆司・三浦修一・長尾真 (1984a), フーリエ変換を用いた構造解析, 情報処理学会論文誌, 23(2): 142 - 149.
- [9]三浦修一・松山隆司・長尾真 (1984a), トーラス状の位相空間を用いた規則的テクスチャ構造の理論的解析, 情報処理学会論文誌, 25(3): 465 - 476.
- [10]三浦修一・松山隆司・長尾真 (1984b), 規則的なテクスチャ画像の構造解析, 情報処理学会論文誌, 25(3): 477 - 487.
- [11]A.P. Witkin (1981): Recovering surface shape and orientation from texture. Artificial Intelligence, 17: 17 - 45.