ステレオ視と Evolutionary Programming を用いた
Shape-from-shading の統合による表面形状計測*小林 太^{*1}, 福田 敏男^{*2}
下島 康嗣^{*3}, 田草川 照彦^{*4}Shape Measurement Method by Integrating Stereo Vision and
Shape-from-Shading with Evolutionary ProgrammingFutoshi KOBAYASHI, Toshio FUKUDA,
Koji SHIMOJIMA and Teruhiko TAKUSAGAWA

In this paper, we propose a new method for measuring the shape of objects. The proposed method is based on integrating stereo vision and Shape-from Shading with Evolutionary Programming (EP). In some traditional methods the reflection of objects is diffuse reflection. But because the reflection of real objects consists of diffuse and specular reflection, some methods cannot be applied to real objects. Photometric stereo can be applied to real objects but this method needs many original image for measuring the shape accurately. The proposed method can apply Phong model to a reflectivity function and measure the shape of the object which have the effect of diffuse and specular reflection. Then, this method uses EP for identifying the reflectivity function accurately.

Key Words: Shape Measurement, Image Processing, Information Processing and Signal Analysis, Artificial Intelligence, Stereo Vision, Shape-from-Shading, Evolutionary Programming

1. はじめに

形状測定および認識は、工学並びに産業界において、製品の品質管理、検査等に応用されるため、非常に重要である⁽¹⁾。そこで、従来、カメラより得られた画像から対象物の三次元形状を抽出するさまざまな方法が提案されている。画像から形状を抽出する方法は2種類に大別できる。一つは三角測量を原理としたステレオ視(Stereo Vision)⁽²⁾で、もう一つは輝度値から物体面の傾きを抽出する Shape-from-Shading⁽³⁾⁽⁴⁾である。

ステレオ視では、画像間で対象物の同一点を求めるいわゆる対応点探索問題が重要な問題である。この問題に対して、従来より粗密解析法⁽⁵⁾、動的計画法⁽⁶⁾、構造解析法⁽⁷⁾、その他さまざまなアルゴリズムが開発されてきた。しかし、これらの方法是对応点探索の特徴点として通常エッジ点を用いているため、エッジ点の対応は求められても、エッジ以外の点の対応を求める

ことはできない。そこで、エッジの対応を求めた後、エッジ間の内挿補間する処理が必要とされる。これまで、一様な平面に対して多面体の幾何表現に基づいて面を求める方法⁽⁸⁾、テクスチャ面に対して直接的に局所的相関を計算して対応を求める方法が提案されてきた。しかし、シェーディング面に対しては、局所的な輝度こう配に基づく弛緩法を適用する間接的な方法しか提案されていない。

Shape-from-Shading は、Horn によって1977年に定式化され⁽³⁾⁽⁹⁾、その後 Woodham により照度差ステレオ法が1980年に提案された⁽⁴⁾。照度差ステレオ法は、一つの固定されたカメラと複数の異なる方向に配置された光源を用い、それぞれの光源により対象物を照射し撮像した複数の画像から、輝度値の差により物体表面の法線ベクトルと反射率を求める方法である。このため、表面形状を復元できる領域は複数の光源すべてで照明される領域に限定され、より少ない光源で法線ベクトル、反射率を求める方法が必要とされている。また、従来、Shape-from-Shading に用いられる輝度方程式の多くは完全拡散モデルであり、実際に対象物の形状を計測することが不可能である。そこで、対象物の性質によって異なる関数モデルで表現することにより面素の傾きを求める方法が提案されてい

* 原稿受付 1997年1月21日。

*1 名古屋大学大学院 (☎ 464-8603 名古屋市中種区不老町1)。

*2 正員、名古屋大学先端技術共同研究センター。

*3 正員、名古屋工業技術研究所 (☎ 464-8510 名古屋市中北区平手町1)。

*4 日本航空(株) (☎ 144-0041 東京都太田区羽田空港1-6-3)。

る^{(10)~(12)}。しかし、これらの方法では、未知パラメータの個数より多くの輝度方程式が必要であり、多くの濃淡画像を用いなければならない。

本論文では、ステレオ視と Shape-from-Shading の二つの視覚モジュールを用いて、未知の対象物の表面形状の計測を行う方法を提案する。本方法では、輝度方程式に Phong が提案した反射モデル⁽¹³⁾を用い、反射光に乱反射成分だけでなく金属のような正反射成分をもつ対象物に対しても適用する。しかし、このような対象物の法線ベクトルを同定する場合、反射率地図を用いた照度差ステレオ法では多くの画像を必要とする。また、観測系は集中投影であり、輝度方程式が複雑になるため、従来のこの配法と行った検索法では同定が困難である。そこで、本方法では Shape-from-Shading で用いる輝度方程式の同定に EP⁽¹⁴⁾を用いる。最後に、本方法を計算機で作成した対象物の画像に適用し、その有効性を示す。

2. 形状計測システム

2.1 観測系 本論文で用いる観測系を図1に示す。ここで、 P , n , s , v はそれぞれ対象物表面の微小面素、面素 P の法線ベクトル、光源方向ベクトル、視線方向ベクトルを表す。対象物上での三次元座標と画像上での座標の関係は式(1)で示す集中投影で与えられる。

$$a = f \frac{x}{z} \text{ and } b = f \frac{y}{z} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f はカメラの焦点距離を表す。光源は天頂角 α 、方位角 β 、距離 R の位置に配置されている。

本論文では、ステレオ視用にカメラを原点の位置と原点から y 軸上に移動した位置で撮像した2枚の画

Fig.1 Observation system

像, Shape-from-Shading 用にカメラを原点に固定し、二つの光源を用いて撮像した2枚の画像を用いる。

2.2 ステレオ視(Edge-based-Stereo)

ステレオ視は複数の画像から対象物のそれぞれの画像上における位置(対応点)を探索し、得られた対応点から三角測量を応用してカメラから対象物までの距離を計測する方法である。本論文では、構造解析法を用いた対応点探索を行う。ここで、ステレオ画像はカメラを y 軸上で移動させて撮像しているので、対応点探索は y 軸と平行なエピポーラ線上でのみ行う。

2.2.1 エッジ抽出とサブピクセル化 カメラを移動させ、二つの地点での対象物の画像を獲得する。この得られた画像にそれぞれエッジ抽出フィルタ(Prewitt Filter)をほどこし、エッジを抽出する。得られたエッジ画像に式(2)に示すサブピクセル法⁽¹⁵⁾を適用し、エッジ位置をサブピクセル単位で計測する。

$$u_n = u_c + \frac{\ln f'(u_c+1) + \ln f'(u_c-1)}{2\{2 \ln f'(u_c) - \ln f'(u_c+1) - \ln f'(u_c-1)\}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $f'(u_c)$ はエッジ点 u_c に対しての輝度値の一次微分値を表す。

2.2.2 対応点探索 本論文では構造解析法を応用し、以下に示した2段階の対応点探索を用いる。

- Matching based on Edge Segment
- Matching based on Pixel in a Edge Segment

エッジセグメントの探索では、各セグメントはそれぞれ面積が異なっており、またグループ特有の形状もっているため、輝度値のほかに面積および形状を考慮し、探索を行う。セグメント内の対応点探索ではエッジ点に関してエピポーラ線上で対応点の探索を行う。また、あらかじめそのエッジ点が属するセグメントの対応ができているので、その対応点は対応するセグメント内に存在している。ここで、対応点の候補となる点に対して式(3)を計算し、その fit が最小となる点を対応点とする。

$$fit = \sum_{s=-w_i}^{w_i} \sum_{t=w_j}^{w_j} [\{D_1(i_1+s, j_1+t) - D_2(i_2+s, j_2+t)\} - \{D_1(i_1, j_1) - D_2(i_2, j_2)\}] \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $D(i_1, j_1)$, $D(i_2, j_2)$ はステレオ画像それぞれの輝度値を表す。また、 w_i , w_j はセグメントの形状から決定されるウィンドウサイズを表す。

2.2.3 距離計算 2.2.2項で求めた対応点から

三角測量を応用し、式(4)から距離を計算する。

$$H = \frac{fL_1 + L_2b_2}{b_1 - b_2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 b_1 , b_2 は対応点、 f は焦点距離、 L_1 , L_2 はカメラの y 方向、 z 方向の移動距離を表す。

2・3 EP を用いた Shape-from-Shading 明るさ解析法の一つである Shape-from-Shading は画像の明るさ(輝度)と面の傾きとの関係を照度方程式を用いて記述し、この照度方程式から形状の計測を行う方法である。本論文では、この照度方程式を EP により同定し、形状を計測する。

2・3・1 照度方程式 観測される面素の輝度 D に関する照度方程式は、反射特性関数を ϕ とすると、

$$D = \phi(\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{v}) \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 $\mathbf{n}$ は面素法線ベクトル、 $\mathbf{s}$ は光源方向ベクトル、 $\mathbf{v}$ は視線方向ベクトルを表す。また、 ϕ は物体固有の表面の性質によって決まる関数である。 ϕ に対してはいくつかのモデルが提案されており、本論文では正反射成分をもつ一般的な物体を対象とし、乱反射物体から正反射物体まで表現できる Phong のモデル⁽¹³⁾ を用いる。Phong のモデルでは関数 ϕ を、

$$\phi = C\{l \cos^m \phi + (1-l) \cos \theta\} \dots\dots\dots (6)$$

と表す。ここで、 C , l , m は対象物固有の反射パラメータ、 θ , ϕ はそれぞれ法線ベクトル方向と入射光の方向との角度、反射光の方向と視線方向との角度である。また、 C , l , m はそれぞれ光源の光度や物体面の反射率を含めた比例乗数、拡散反射成分に対する正反射成分の強さの割合、正反射成分のピークの幅(鋭さ)を表す。 $\cos \theta$, $\cos \phi$ はそれぞれ式(7), (8)で表せる。

$$\cos \theta = \mathbf{n} \cdot \mathbf{s} \dots\dots\dots (7)$$

$$\cos \phi = \mathbf{s}' \cdot \mathbf{v} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\mathbf{s}'$ は光源の鏡面反射方向ベクトルで、

$$\mathbf{s}' = 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{s})\mathbf{n} - \mathbf{s} \dots\dots\dots (9)$$

と表せる。

ある面素の傾きを p , q とすると、図1より $\mathbf{n}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{s}$ は、それぞれ

$$\mathbf{n} = \frac{(p, q, -1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \dots\dots\dots (10)$$

$$\mathbf{v} = -(x, y, z) = -\frac{z}{f}(a, b, f) \dots\dots\dots (11)$$

$$\mathbf{s} = \frac{\begin{pmatrix} R \sin \alpha \cos \beta - x \\ R \sin \alpha \sin \beta - y \\ -R \cos \alpha - z \end{pmatrix}}{\sqrt{L}} \dots\dots\dots (12)$$

$$L = (R \sin \alpha \cos \beta - x)^2 + (R \sin \alpha \sin \beta - y)^2 + (R \cos \alpha + z)^2$$

と表せる。ここで、面素の傾き p , q は、

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} \dots\dots\dots (13)$$

以上より輝度 D に関する照度方程式は、

$$D = \phi(p, q, C, l, m, R, \alpha, \beta) \dots\dots\dots (14)$$

と表せる。

また、Shape-from-Shading において二つの光源を用いた場合、それぞれの光源からの照射光による輝度値 D_1 , D_2 は、

$$\begin{cases} D_1 = \phi(p, q, C, l, m, R_1, \alpha_1, \beta_1) \\ D_2 = \phi(p, q, C, l, m, R_2, \alpha_2, \beta_2) \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

と表せる。

2・3・2 距離計算 法線ベクトルを求めた点での距離から、その周りの点の距離を式(16)で求める。法線ベクトルを計算した点(a_1 , b_1)の距離を z_1 、その法線ベクトルを(p_1 , q_1 , -1)とすると、点(a_2 , b_2)の距離 z_2 は

$$\begin{aligned} z_2 = z_1 + p \frac{z_1\{(f - qb_1)(a_1 - a_2) + qa_1(b_1 - b_2)\}}{f(f - pa_2 - qb_2)} \\ + q \frac{z_1\{pb_1(a_1 - a_2) + (f - pa_1)(b_1 - b_2)\}}{f(f - pa_2 - qb_2)} \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

と表せる。

2・3・3 EP による照度方程式の同定 照度方程式のパラメータの性質を表1に示す。ここで、対象物のある面の形状計測を行う場合、その面内では対象物の材質は変化しないため、その面内の面素に対して反射パラメータ C , l , m は一定である。また、光源はあらかじめ配置されており、光源に関するパラメータ R , α , β は対象物のすべての面素に対して一定である。つまり、ある面の形状測定を行う場合、照度方程式の変化するパラメータは傾きパラメータ p , q のみである。そこで、 C , l , m , R , α , β を一定とし、各面素において傾きパラメータ p , q を EP により同定する。

EP はダーウィニズムに基づく確率的探索法であり、

Table 1 Character of the parameters

Parameter	for a Pixel in a Surface	Range
p	variable	$-\infty < p < \infty$
q	variable	$-\infty < q < \infty$
C	constant	$0 < C \leq 1$
l	constant	$0 < l < 1$
m	constant	$m \geq 0$
R	constant	$R \geq 0$
α	constant	$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$
β	constant	$-\pi < \beta \leq \pi$

Fogel らによって提案された⁽¹⁴⁾。EP のアルゴリズムを以下に示す。

```

procedure of Evolutionary Programming
begin
  t ← 0
  initialization
  evaluation
  while (not termination-condition) do
    begin
      t ← t + 1
      selection
      mutation
      evaluation
    end
  end

```

EP における突然変異は、式(17)に示すように正規乱数を加えることにより行う。

$$x_{n+i,j} = x_{i,j} + N(0, a \cdot \text{fitness} + b) \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 $x_{i,j}$ は個体 i を表したものであり、 n は個体数を表す。

EP で用いる適合度関数は、

$$\begin{aligned} \text{fitness} \\ = \sum_{s=a-1}^{a+1} \sum_{t=b-1}^{b+1} \left\{ \begin{aligned} &W_1 \times \Delta D(s, t) \quad (s=a, t=b) \\ &W_2 \times \Delta D(s, t) + W_3 \times \Delta H(s, t) \\ &\quad (s \neq a, t \neq b) \end{aligned} \right. \\ + W_4 \times c_1 \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

$$\Delta D(s, t) = \frac{1}{2} \{ D_o(s, t)_{EP} - D_o(s, t)_{org} \}^2 \dots (19)$$

$$\Delta H(s, t) = \frac{1}{2} \{ H(s, t)_{EP} - H(s, t)_{prev} \}^2 \dots (20)$$

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0 \leq D_o(s, t)_{EP} \leq 255) \\ 0 & (D_o(s, t)_{EP} > 255) \end{cases} \dots (21)$$

と表せる。ここで、 o は光源の番号を表し、 $D_o(s, t)_{EP}$

は EP によって同定された p, q を用いて計算した輝度値、 $D_o(s, t)_{org}$ は原画像の輝度値、 $H(s, t)_{EP}$ はその画素での距離と法線ベクトルより式(16)により計算した近傍画素の距離、 $H(s, t)_{prev}$ はすでに法線ベクトルを同定した近傍画素の距離を表す。

2.4 ステレオ視と Shape-from-Shading の統合による形状計測

図2に本論文で提案する形状計測方法の流れ図を示す。まず、獲得した原画像から $2 \cdot 2 \cdot 2$ 項で示した対応点探索法によりエッジ点の対応点を決定し、式(4)によりエッジ点の距離を計算する。ここで、距離を計算するエッジ点は画像内のすべてのエッジ点である。これによりエッジ点のみの対象物の形状が獲得される。次に、EP を用いた Shape-from-Shading により対象物全体の法線ベクトルの推定を行う。法線ベクトルの推定は原画像のラスタスキャンラインに沿って行う。このとき、推定を行う画素の距離はすでに距離が求まっている近傍の四つの画素点より式(16)によりそれぞれ計算し、それらの平均を取った値とする。このように、Shape-from-Shading により法線ベクトルを推定する過程において、対象物全体でのそれぞれの画素の距離も計算し、対象物の表面形状の計測を行う。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション条件 提案するステレオ視と Shape-from-Shading の統合による形状計測法を計算機で作成したシミュレーション画像に適用する。シミュレーションで用いる対象物は平面と多面体である。ここで、作成するシミュレーション画像の輝度値は Phong のモデルを用いた照度方程式により計算し、レンズのシェーディングなどレンズ系の影響やノイズについては考慮しない。シミュレーション画像は 256 階調(8-bit)で、画像サイズは 512×512 である。また、光源を二つ用いて計測を行った。画像はステレオ視用にカメラを $(0, 0, 0)$, $(0, 5.0, 0)$ に配置し、光源1を照射し撮影した画像2枚、Shape-from-Shading 用にカメラを $(0, 0, 0)$ に固定し、光源1、光源2を照射し撮影した画像2枚、計3枚を用いた。今回は、Shape-from-Shading において反射パラメータ (C, l, m) と二つの光源の位置を既知として p, q の同定を行った。表2, 3に反射パラメータと光源の位置を示す。

3.2 平面の再構成 計算機により作成したさまざまな平面に対して提案した手法を適用し、平面の再構成を行う。平面は表4に示した傾きにした9種類を用意した。これら一つ一つの平面に対し、EP を用い

Fig.2 The procedure of shape measurement system

Table 2 The reflection parameters

parameter	value
C	0.85
l	0.28
m	16.10

Table 3 The light source position

parameter	light source #1	light source #2
R	50.0	50.0
α	$\pi/6$	$\pi/6$
β	$-\pi/4$	$\pi/4$

Table 4 Gradient of plane surface

Surface	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
p	0.0								
q	1.0	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.6	-0.1

Surface		Average	Variance
#1	p	2.5212×10^{-4}	1.0419×10^{-7}
	q	9.6169×10^{-4}	6.5330×10^{-7}
#2	p	1.4669×10^{-3}	4.6581×10^{-4}
	q	1.2761×10^{-3}	4.1816×10^{-4}
#3	p	8.4714×10^{-4}	1.2647×10^{-4}
	q	7.9373×10^{-4}	1.1152×10^{-4}
#4	p	3.7800×10^{-5}	7.5483×10^{-7}
	q	3.6436×10^{-5}	6.6474×10^{-7}
#5	p	7.3115×10^{-5}	1.5410×10^{-8}
	q	7.2190×10^{-5}	1.5150×10^{-8}
#6	p	4.5064×10^{-5}	2.2140×10^{-6}
	q	4.5978×10^{-5}	2.1928×10^{-6}
#7	p	6.4454×10^{-5}	8.6128×10^{-9}
	q	6.4931×10^{-5}	3.4103×10^{-9}
#8	p	2.9045×10^{-4}	1.2460×10^{-7}
	q	7.9411×10^{-5}	4.8170×10^{-9}
#9	p	3.3779×10^{-4}	1.9127×10^{-7}
	q	9.4104×10^{-5}	5.8178×10^{-9}

Table 6 Square error of gradient

Gradient	Average	Variance
p	2.3718×10^{-3}	1.6259×10^{-3}
q	2.0235×10^{-3}	1.0265×10^{-3}

(a) Original image

(b) Simulated surface (z - y plane)

(c) Stereo vision

(d) Gradient p (e) Gradient q

(f) Reconstructed surface

(g) Gradient p (p - y plane) (h) Gradient q (q - y plane) (i) Reconstructed surface (z - y plane)

Fig. 3 Estimation result (polyhedron)

た Shape-from-Shading により傾きパラメータ p, q の推定を行い、再構成を行った。表 5 は、それぞれの平面を撮像した画像の傾きパラメータの二乗誤差の平均値および分散である。

表 5 からわかるように、正反射成分を成分をもつ対象物に対して、本手法により正確に傾きパラメータの推定が行えている。しかし、平面の傾きに応じて二乗誤差が変化しており、どの平面に対しても同じ精度で傾きパラメータの推測ができていない。これは、平面への光源の入射方向により推測のしやすさが変化していると考えられる。

3.3 多面体の再構成 計算機で作成した多面体に対し、本手法を適用し多面体の再構成を行う。作成した多面体は図 3(b) に示す断面である。また、この多面体を撮像した原画像を図 3(a) に示す。

傾きパラメータの二乗誤差の平均値および分散を表 6 に示す。図 3(b) は作成した多面体の断面図であり、図 3(c) はステレオ視の結果である。図 3(d), (e), (g), (h) に EP を用いた Shape-from-Shading の推論結果、図 3(f), (i) に多面体の再構成結果を示す。

図 3 および表 6 より本手法は多面体に対しても適用可能なことが示された。また、EP を用いることにより多面体に対する反射率地図がない場合でも、多面体の再構成が可能なことを示した。

4. ま と め

本論文では、ステレオ視と Shape-from-Shading の統合による形状計測法を提案した。また、Shape-from-Shading に Evolutionary Programming を用い、照度方程式の未知パラメータの同定を行った。これにより、照度方程式の微分計算や反射率地図を用いず、また、面素法線ベクトルを求めるのに対象物に対して光の照射方向を二方向に限定し対象物の再構成が可能となった。本手法では、金属のような鏡面反射成分をもつ対象物に対して輝度方程式に Phong のモデル式を用いることにより形状計測が可能となった。

本論文においてシミュレーションで用いた対象物

は、凸状のものに限定して本手法を適用したが、相互反射がおきない凹の多面体および曲面にも本手法を改良することなく適用できる。しかし、相互反射がおきる凹の多面体、曲面をもつ対象物に対しては、相互反射の影響を考えなければならず、本手法で用いた反射モデルを改良する必要がある。また、今後はさらに一般的な対象物の反射モデルを照度方程式に用いることにより実際の対象物の再構成を行う必要がある。

文 献

- (1) 下島康嗣・ほか 5 名, 移動立体視による形状計測, 第 12 回日本ロボット学会学術講演会, (1994), 703-704.
- (2) Barnard, S. T. and Fischler, M. A., Computational Stereo, *Computing Surveys*, **14**(1982), 553-572.
- (3) Horn, B. K. P., Understanding Image Intensities, *Artificial Intelligence*, **8**(1977), 201-231.
- (4) Woodham, R. J., Analysing Images of Curved Surfaces, *Artificial Intelligence*, **17-8**(1981), 117-140.
- (5) Grimson, W. E. L., Computational experiments with a feature based stereo algorithm, *IEEE trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **7-1**(1985), 17-34.
- (6) Ohta, Y. and Kanade, T., Stereo by intra-and inter-scanline search using dynamic programming, *IEEE trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **7-2**(1985), 139-154.
- (7) Medioni, G., Nevatia, R., Segment-based stereo matching, *CVGIP*, **31**(1985), 2-18.
- (8) 杉本和英・富田文明, ステレオによるシーンの解釈, 電子情報通信学会論文誌, **J76-3**, D-II (1993), 524-533.
- (9) Horn, B. K. P. (Winston, P. H. 編), Obtaining Shape from Shading Information, *The Psychology of Computer Vision*, (1975), 115-155.
- (10) 池内克史, 反射率地図に基づき、二次元濃淡画像により三次元形状を再構成する 2 手法, 信学論, **J65-7**, D-II (1985), 842-849.
- (11) 岩堀祐之・ほか 3 名, 未知の反射特性をもつ物体に対する拡張照度差ステレオ, 信学論, **J71-1**, D-II (1988), 110-117.
- (12) 楊駿・ほか 2 名, 2 光源ホトメトリックステレオ法による多面体の形状復元と反射率の推定, 信学論, **J78-2**, D-II (1995), 292-301.
- (13) Phong, B. T., Illumination for computer generated pictures, *Commun. of the ACM*, **18**(1975), 311-317.
- (14) Fogel, L. J., *Evolutionary Programming in perspective*, (1994), 135-146, New York: IEEE Press.
- (15) 野村由司彦・ほか 3 名, エッジ位置計測のサブピクセル化と誤差解析, 信学論, **J73-9**, D-II (1990), 1458-1467.