

## 幾何拘束を用いたエッジ画像からの一般円筒の抽出

佐藤 宏 明† トーマス ビンフォード††

本論文では、背景や照明の影響による多数のエッジをも含む画像から、1つの物体を構成するエッジの組を抽出するエッジグループニングの問題を汎用的な形状モデルである一般円筒 (Straight Homogeneous Generalized Cylinder: SHGC) を用いて解決する一連のアルゴリズムを提案する。これは、1つの SHGC を構成するエッジの組を、SHGC の定義から導かれるエッジ間の幾何拘束を用いてグループ化するものである。まず、一般円筒の両端面 (end) となるエッジに側線 (limb) や経線 (meridian) よりも強い幾何拘束があることに着目し、端面エッジ上のエッジ素対に関する拘束を規定するパラメータ空間への射影を用いて、1つの一般円筒物体の両端となり得るエッジの組を抽出する。次いで、抽出された端面エッジを連結するエッジ経路の組を経線エッジに対する幾何拘束を用いて刈り込み、1つの物体に対する端面エッジと経線エッジの両者が得られる。提案されたアルゴリズムは、大きな計算量を要求するが、断面・経線エッジ全体が観察される場合、断面形状、掃引関数、断面と軸のなす角度を制限せず、任意の SHGC に対して適用可能である。いくつかの形状の物体に対する複数の実画像からの抽出結果を示す。

## Extracting Straight Homogeneous Generalized Cylinders from an Edge Image by Utilizing Geometrical Constraints

HIROAKI SATO† and THOMAS BINFORD††

In this paper, we present an algorithm to group edges which could be from a straight homogeneous generalized cylinder (SHGC). Geometrical constraints for the ends and meridians of an SHGC are utilized to group edge segments in a complex image. The algorithm consists of two modules, i. e. end-edge-finder and meridian-edge-finder. Since the ends have stronger constraints than the meridians or limbs, the end-edge-finder groups edge segments by transforming them to a parameter space corresponding to the end-constraints in the first place. Then the meridian-edge-finder searches edge paths that connect the detected end edges, and prune them with the constraints for meridian edges to select a group of edges which could be described as an SHGC. Several examples of the ends and meridians extracted from real images are reported to show the feasibility and limitation of the algorithm.

## 1. はじめに

1枚の画像データから物体の3次元構造を復元する場合、2次元への投影過程で生じる情報欠落を補うために、しばしば何らかのモデルを用いる<sup>2)</sup>。一般円筒 (Generalized Cylinder, GC) は曲面を含む物体の記述に利用される形状モデルであり、断面 (cross-section) を軸 (axis) に沿って変形させながら掃引した空間領域として得られる<sup>1)</sup>。SHGC (Straight Homogeneous Generalized Cylinders) は、軸を直線、変形を軸周りの相似的な拡大縮小として物体を表す一般円筒の部分集合である<sup>7)</sup>。

1つの一般円筒 (SHGC) 物体の断面および側線 (limbs) に対応する画像中のエッジが与えられた時、これらから物体の3次元構造を復元する問題には多くの研究報告がある<sup>11), 13)</sup>。しかしながら、実画像から3次元構造を得るのは困難な場合が多い。これは、(1) 対象物体自体が複数の一般円筒の組合せであったり、(2) 背景、物体表面の模様・反射特性、光源の影響などから対象物体の形状とは無関係な多数のエッジが画像中に含まれることなどによる。すなわち、画像中から1つの物体を構成するエッジの組を抽出することが重要な問題となってきた。

エッジ画像からの構造抽出に関しては、平行線・楕円などの抽出に基づく方法<sup>12)</sup>や、リボン (ribbon)<sup>4)</sup>の検出、Brady などによる Smoothed Local Symmetry の検出<sup>3)</sup>などの、主に2次元対称性に注目した検討が行われてきた。また、Saint-Marc と Medioni

† キヤノン(株)情報システム研究所  
Information Systems Research Center, CANON  
INC

†† スタンフォード大学ロボティクス研究所  
Robotics Laboratory, Stanford University

は斜対称 (skewed symmetry) と平行対称 (parallel symmetry) をエッジの B-スプライン表現を用いて実画像から検出する方法を示した<sup>9)</sup>.

Mohan と Nevatia は、1つの物体を構成するエッジの組を抽出する問題に対して、神経回路網を用いて無矛盾なリボンの組を得るという方法を示し、エッジ画像中の各部分領域の記述を得ている<sup>5)</sup>.

一方、SHGC のエッジの幾何学的性質を解析することは、まず Shafer らによって示された<sup>10)</sup>. さらに Ponce らは、微分幾何学の手法により側線エッジの投影に対する不変量を示し、これを用いて物体の軸をエッジ画像から検出するアルゴリズムを示している<sup>7)</sup>.

本論文では、エッジのグループ化の問題に汎用モデルである SHGC を利用する。ここで、我々は、対象物体を SHGC と仮定した場合に、端面エッジに側線や経線よりも強い幾何学拘束があることに着目し、モデルから導かれる幾何学的拘束条件のみを用いて実画像から SHGC 物体を抽出するアルゴリズムを実現した。

以下では、まず第2章で SHGC の性質を述べ、第3章で手法の全体の流れと端面エッジの検出方法、第4章で経線エッジの検出方法について述べる。

## 2. 一般円筒の幾何学的性質

Ponce らの定義に従い、一般円筒 (SHGC) を以下のように定義する。

定義: SHGC は1つの断面を直線の軸に沿って変倍しながら掃引して得られる空間領域を占有する物体である。

ここで、断面の形状は任意であり、軸と直交していなくても構わない。また、変倍の仕方は掃引関数 (sweeping rule) により与えられる。すなわち、図1の座標系を考えた時、SHGC 物体の形状は、断面関数  $\rho(\theta)$  と掃引関数  $r(z)$  を用いて以下のように表される。

$$\vec{OP}(z, \theta) = \rho(\theta)r(z)(\cos \theta \vec{i} + \sin \theta \vec{j}) + z\vec{a};$$

$$(z, \theta) \in [0, l] \times [0, 2\pi]$$

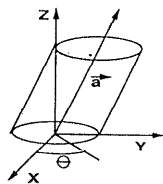


図1 SHGC 座標系

Fig. 1 A coordinate system for SHGC objects.

$\vec{OP}$  は物体表面の点の位置ベクトル、 $\vec{a}$  は  $z$  の単位長さ分の物体中心軸の方向ベクトル、 $\vec{i}, \vec{j}$  は断面と平行な面内の2つの軸方向の単位ベクトルである。

物体の両端 ( $z=0$  および  $z=l$ ) で与えられる曲線は端面エッジ (end),  $\theta$ =定数で与えられる断面上の一点の軌跡は経線 (meridian) と呼ばれる。また、画像中に投影した場合に側面の外縁として観察されるエッジは側線 (limb) と呼ばれる。

ここで、両端面エッジ上で  $\theta$  の等しい点を端面エッジ上の対応点、2つの経線上で  $z$  の等しい点を経線エッジ上の対応点とする。これらの対応点にある一対のエッジ素は、「(端面エッジまたは経線エッジ上の) 対応エッジ素対」を構成する。また、一組の端面エッジもしくは経線エッジ全体を構成する対応エッジ素対の集合を「(端面エッジまたは経線エッジを構成する) 対応エッジ素対群」と呼ぶことにする。

画像中でのエッジに対し、画像の形成過程を正射影と仮定すると、以下の拘束条件が得られる<sup>7),9),11)</sup>. まず、端面エッジに関する拘束条件を示す (図2)。

端面拘束1: 端面エッジ上の対応エッジ素対の方向は一致する。

端面拘束2: 端面エッジを構成する対応エッジ素対群中の各エッジ素対で計算した変倍比はすべて一致する。ここで、2つの断面での変倍率の比を変倍比と呼ぶ。

端面拘束3: 端面エッジを構成する対応エッジ素対群中のどの2つのエッジ素対 ( $e_1, e_2$ ) ( $e_1', e_2'$ ) を選んでもそれらの延長線は軸上の一点で交差する。(この点を焦点と呼ぶ。)

端面拘束4: 変倍比が1の場合、端面エッジを構成する対応エッジ素対群中のどの2つのエッジ素対 ( $e_1, e_2$ ) ( $e_1', e_2'$ ) を選んでもそれらを結ぶベクトル  $\vec{e}_1 e_2$  と  $\vec{e}'_1 e'_2$  は一致する。

端面拘束5: 変倍比は、端面エッジ上の対応エッジ素の曲率の逆数比に等しく、また、焦点とエッジ素対をなす各エッジ素との距離の比に等しい。

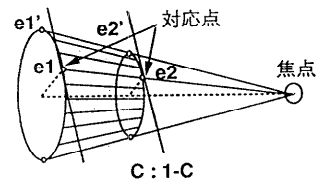


図2 端面エッジの幾何学関係

Fig. 2 Geometrical relation between end edges.

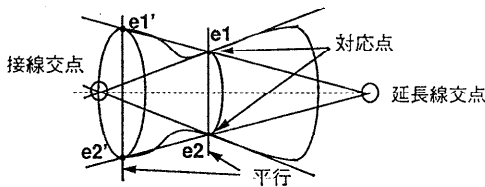


図3 経線エッジの幾何学関係

Fig. 3 Geometrical relation between meridian edges.

経線の対応エッジ素対に対しては、以下のような拘束が存在する (図3)。

経線拘束1 (接線交点の拘束): 経線エッジ上の対応点での接線は軸上の一点で交差する。(この点を接線交点と呼ぶ。)

経線拘束2: 経線を構成する対応エッジ素対群中のどの2つのエッジ素対  $(e1, e2)$  ( $e1', e2'$ ) を選んでも、それらを結ぶベクトル  $\vec{e1e2}$  と  $\vec{e1'e2'}$  は平行である。

経線拘束3: 経線を構成する対応エッジ素材群中のどの2つのエッジ素材  $(e1, e2)$  ( $e1', e2'$ ) を選んでも、同一経線上にある  $(e1, e1')$ ,  $(e2, e2')$  を通る線の延長は軸上の一点で交差する。(この点を延長線交点と呼ぶことにする。)

### 3. 端面エッジの検出

本論文で示すアルゴリズムへの入力は Canny のエッジ抽出オペレータの改良版等を用いて得られた一枚のエッジ画像である。ここで、エッジ画像中のエッジはエッジ素の位置もしくは方向の不連続点、または曲率の極大/極小点で分断されているものとする。

アルゴリズムは、まず与えられた注目エッジを用いて、SHGC 物体の両端となるエッジの組 (端面エッジ) を抽出する (図9, 図10参照)。第2に、抽出された端面エッジの組を用いてこれを両端とする SHGC 物体の経線エッジとなり得るエッジの組を抽出する (図14参照)。

端面エッジには2章で示した強い拘束条件が存在する。端面エッジを抽出するアルゴリズムはハフ変換同様、エッジ素あるいはエッジ素の組のある種のパラメータ空間に射影し、そこでグループ化を行うことで目的のエッジ対を抽出する。端面拘束条件より、焦点の位置および断面の変倍比をパラメータとした場合に、このパラメータ空間は断面形状や掃引関数に依存せず、エッジ素をグループ化することがわかる。すなわち、最も単純なアルゴリズムは以下のように構成さ

れる。「すべてのエッジ素の対を生成し、それらのエッジ方向が等しいか判定し、等しい組に対して曲率より変倍比を、変倍比より焦点位置を計算し、焦点位置および変倍比を軸とする空間に割り付ける。次いで、このパラメータ空間で同一の領域に割り付けられたエッジ素が一对のエッジの組を構成するかどうかを検定することで端面エッジの組を得る。」

ここで問題になるのは、エッジでの曲率の計測精度は変倍比を計算するには低すぎることで、焦点の位置は無限遠となり得、パラメータ空間が無限に大きくなること、である。

前者に対しては、ハフ変換同様、変倍比を変化させ、一对のエッジ素に対して複数の焦点位置仮説を生成することで対処できる。後者に対しては、焦点位置を示す2次元平面を非線形に量子化し、有限の範囲内に交換する。焦点仮説はエッジ素対を通る延長線上に位置する。計測による位置の誤差は延長線の長さ按比例して増大する (図4)。よって、各エッジ素を原点とする極座標  $(r, \theta)$  を用いた場合、角度  $\theta$  の誤差は同様であり、 $r$  の逆数をとることにより径の誤差も同様となる。しかしながら、原点とすべきエッジ素は画像中に分布しているため、画像中では均一に、画像から離れた場合半径の逆数比で量子化されることが望ましい。このような関数の一近似として、画像中心を原点とする極座標を用い、半径方向を非線形関数  $d = a/(r + b)$ 、ここで  $a, b$  は定数、を選択した。焦点仮説のグループ化のためのセルはこれを用いて量子化される (図5)。この関数は原点の近傍では線形 ( $r \ll b$  で  $\frac{a}{b}$   $-\frac{a}{b^2}r$ )、遠方では  $r$  の逆数に比例 ( $r \gg b$  で  $a/r$ ) する

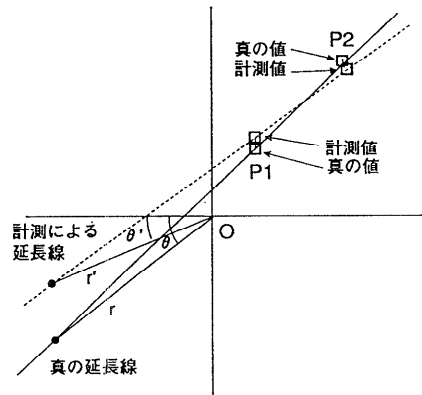


図4 延長による誤差の拡大

Fig. 4 Error in the position of hypothesized origin of scaling.

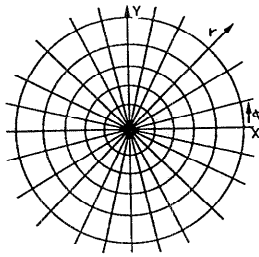


図 5 端面エッジ検出用セル

Fig. 5 Accumulator cells for origin of scaling.

関数に近似できる。これにより、 $\theta$ 、 $d$ の誤差は延長線長さの増大に従ってそれぞれ0、元のエッジ素対の距離と位置誤差により決まる定数へと漸近する。シミュレーションにより計算した誤差の変化の例を図6、図7に示す。図中グラフの横軸は画像のX軸方向の

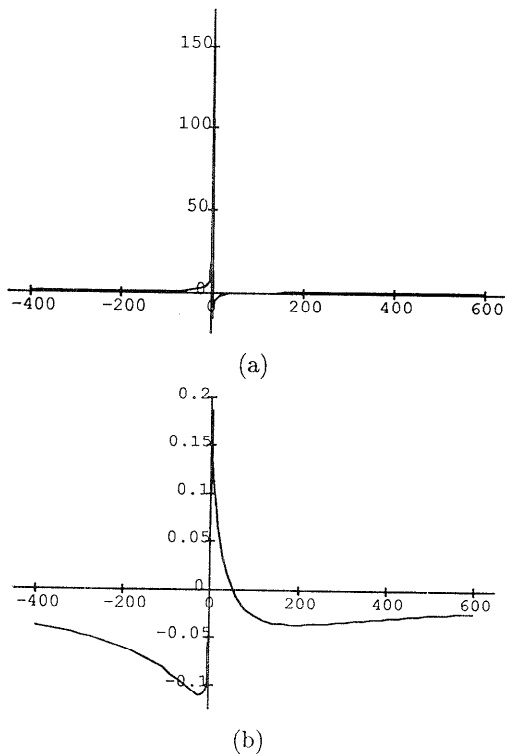


図 6 延長線上での誤差の変化：P1(100,100) 誤差 0.5 画素 45度, P2(50,49) 誤差 0.5画素-45度の場合 (a) 角度  $\theta$  の誤差, (b) 半径  $d$  の誤差

Fig. 6 An example of error distribution along an extension line. (a) error in angle  $\theta$ , (b) error in radius  $d$ .

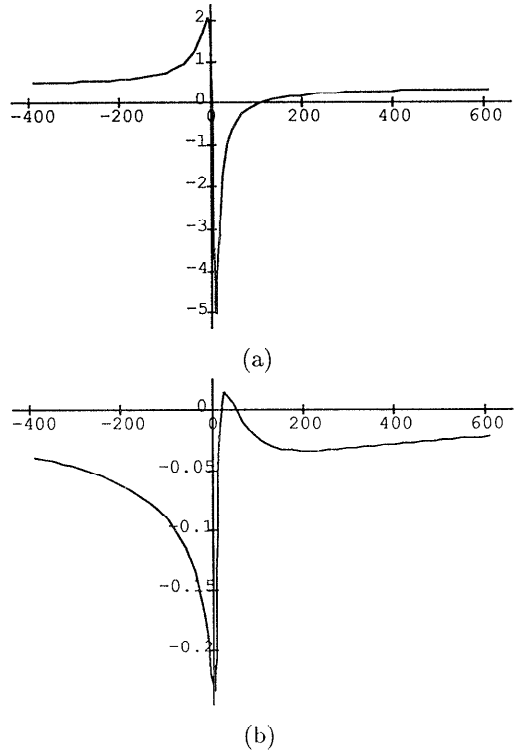


図 7 延長線上での誤差の変化：P1(110,100) 誤差 0.5 画素 45度, P2(60,49) 誤差 0.5画素-45度の場合 (a) 角度  $\theta$  の誤差, (b) 半径  $d$  の誤差

Fig. 7 Another example of error distribution along an extension line. (a) error in angle  $\theta$ , (b) error in radius  $d$ .

位置 [pixels], 角度  $\theta$  の誤差グラフ (a) の縦軸は度 [degree], 径  $d$  の誤差グラフ (b) の縦軸は分割された2次元空間でのセルで計った距離 [cells] である。相対的に誤差の影響が大きくなるのは画像近傍、原点付近であるが、画像近傍では延長線の長さによる誤差の拡大率も小さく、原点付近の小領域を除いて誤差の影響は急速に減少することから、この関数を用いたセル分割で良好な検出性能を期待できる。

特定の幾何学的関係にあるエッジの組を抽出する方法として Nevatia と Binford は projection 技法を提案している<sup>6)</sup>。これは、投影方向を量子化し、投影方向に直交する複数のバケツを用意し、各方向ごとに投影により同一のバケツに入るエッジ素の組に対して幾何学的関係をテストするものである (図8)。

トップダウンモジュールもしくは外部情報により注目すべきエッジが与えられるとすると、与えられた参照エッジと対となる端面エッジを検出するアルゴリズム

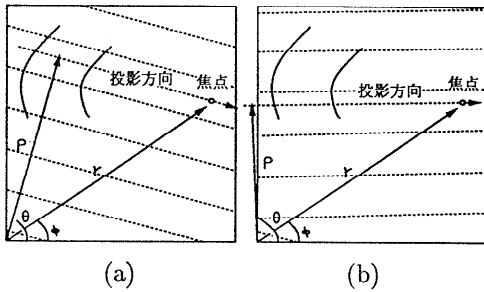


図 8 投影によるエッジのグループ化  
Fig. 8 Grouping edges by projection.

ムは, projection 技法を流用して次のように構成できる.

#### 準備

- 焦点用に 2 次元  $(x, y)$  空間を複数のセル  $C[r, \phi]$  に分割する.
- projection 技法の際の投影方向をいくつかに分量子化し, 投影結果用のバケツ  $B[s]$  を用意する.

#### アルゴリズム

- すべてのエッジ素のエッジ方向を量子化し, 近いエッジ方向を持つエッジ素のグループ, エッジ方向グループを作る. (端面拘束 1)
- projection の各投影方向  $\theta_i - \pi/2$ , および各エッジ方向グループに対して
  - グループ内の各エッジ素を  $\theta_i - \pi/2$  方向に投影し, バケツ  $B[s]$  にエッジ素を挿入する.
  - 各バケツ  $B[s]$  に対し,
    - バケツの位置から投影方向の延長線を想定し,
    - これと交差するすべてのセル  $C[r_k, \phi_k]$  にバケツ  $B[s]$  内のエッジ素グループを複写する. (端面拘束 3)
- それぞれのセル  $C[r, \phi]$  に対して,
  - セル内の各々のエッジ素グループ内で, 参照エッジに属するエッジ素  $E$  と参照エッジ以外のエッジに属するエッジ素  $e$  の組合せからなるすべてのエッジ素対  $(E, e)$  を生成する.
  - セル位置が無限遠点でない場合, セル  $C[r, \phi]$  の位置と 2 つのエッジ素の位置から変倍比を計算し, これに基づき, エッジ素対をグループ化する. (端面拘束 2)
  - セル位置が無限遠点の場合, エッジ素間距

離を計算し, これに基づきエッジ素対をグループ化する. (端面拘束 4)

- 各グループに属するエッジ素対をエッジセグメントに戻し, エッジセグメントの十分大きな部分が再現された場合, 端面エッジが検出される.

アルゴリズムの動作を以下に示す. まず, ステップ 1 でエッジの方向の近いエッジ素がグループ化される. ステップ 2 では, ステップ 1 でできた各グループに対して, エッジ素を組み合わせた際の延長線の方向が投影方向に近く, 延長線同士が近接するエッジ素が各バケツにグループ化され, 各バケツ内のエッジ素のグループが延長線方向の近似である投影方向の各焦点検出用セルに加えられる. ステップ 2 は各々の投影方向および各エッジ方向グループに対して繰り返され, 各セルには投影の方向およびエッジ方向に対応する複数のエッジ素グループが蓄えられる. ステップ 3 では, 各セルの中の各々のエッジ素グループ内で参照エッジとその他のエッジに対応するエッジ素の 2 つ組が生成され, 変倍比の近い 2 つ組がすべてのエッジ素グループに渡って集められる. この結果, 集められた各グループには, 延長線が同一の焦点セルを通過し, 対応するエッジ素の方向が近く, 変倍比の近いエッジ素の組が含まれることになる. ステップ 4 では, エッジ素レベルの対応からエッジレベルの対応を得る. ここで, エッジの 2 つ組に対して, それを構成するエッジ素全体からできる対応エッジ素のうち, どれくらいの比率がステップ 3 で得られた個別のグループに含まれるかを評価する. この際, 1 つの参照エッジに対して複数のエッジの組が対応することが許される.

図 9 と図 10 に入力エッジ画像と抽出されたエッジ対を示す. 図 9 の物体は 2 つの円柱部分からなるが, それぞれが別々に (b), (c) に抽出されている. また, 図 9 (b) では, 1 つのエッジに対して 3 つのエッジの組が対応している. このように提案したアルゴリズムは分断されたエッジを直接グループ化できる. 図 9 (d) に抽出されたエッジは端面エッジではないが, 多面体物体に対応するためにこのような平行直線群も検出される.

グループ化のパラメータであるセルの大きさ, 量子化ステップなどは, 入力されたエッジ画像のエッジ計測精度, エッジ方向・位置の含む誤差に応じて決定する必要がある. ここでは, 正射影の仮定と画像化の際の実際の投影の違いによる変形を吸収するために大きめに設定している. 具体的には, エッジ方向に関して

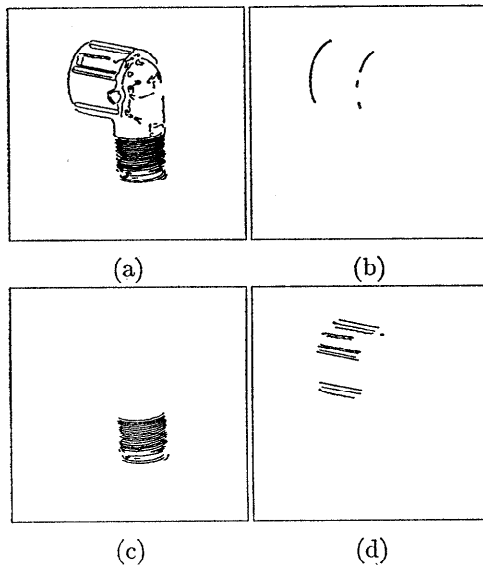


図 9 端面エッジ検出モジュールの結果 1

(a) 入力画像 (ElbowJoint),  
(b)(c)(d) 抽出されたエッジ

Fig. 9 Input image and extracted end edges 1.

(a) ElbowJoint,  
(b)(c)(d) extracted end edges.

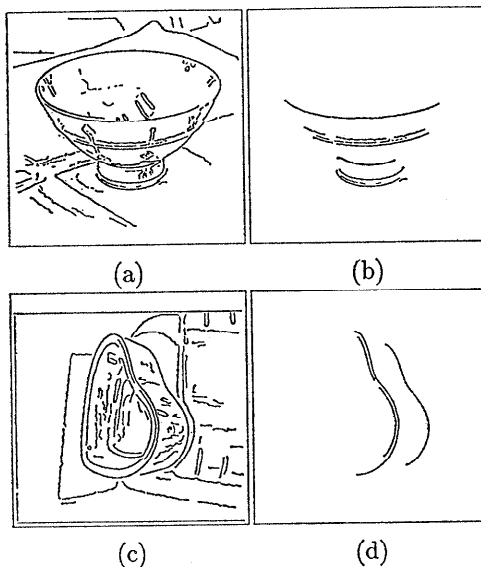


図 10 端面エッジ検出モジュールの結果 2

(a) 入力画像 (RiceBowl),  
(c) 入力画像 (HeartCup),  
(b)(d) 抽出されたエッジ

Fig. 10 Input images and extracted end edges 2.

(a) RiceBowl, (c) HeartCup,  
(b)(d) extracted end edges.

は角度の差が約 10 度以内のすべてのエッジ組が生成される。角度および半径方向のセル分割数はそれぞれ約 30 である。この結果、ほとんどすべての可能な端面エッジ候補が選択される。また、それにもかかわらず、検出されるエッジはそれほど多くない。これは対応エッジとして検出されるには、エッジ全域に対応する十分な (図の例では 50% 以上の) エッジ素が幾何学的条件を満足することが必要なためであり、例えば、図 10(b)の物体上辺左側の 2 重エッジのように、部分的な平行曲線となっても検出されない。誤検出は対応エッジ素間の角度の差が小さく、エッジ同士が平行に近い場合に起こる。よって、エッジ素の対応に曖昧性の大きい平行直線に対して顕著となる。しかしながら、一般のシーン内に存在する曲線同士の場合、局所的には平行に近くともエッジ全域に渡ってこのような条件が成立する場合は少なく、誤検出の可能性は小さい。言えかえれば、端面エッジに対する拘束条件がエッジセグメントに渡って集計されることにより、誤検出エッジを除外するための強い条件となっている。

なお、本アルゴリズムの性質上、参照エッジは長い曲線エッジから選ぶのが適当である。また、参照エッジなしの場合は、すべてのエッジを順に参照エッジとしてアルゴリズムを動作させることで簡単に実現できる。グループ化の条件には全く差がないことから、計算時間は増すが、アルゴリズムの検出性能には違いがない。

#### 4. 経線エッジの検出

##### 4.1 経線エッジの幾何学的拘束の利用

Ponce らは接線交点の拘束を利用してエッジ画像から直接 SHGC の軸を検出するアルゴリズムを示している<sup>7)</sup>。このアルゴリズムは次のように要約できる。画像中のエッジ素に対して、すべての 2 つ組を生成し、これらの接線交点を計算し、ハフ変換を用いて接線交点群が構成する直線を抽出する。この方法の問題点は、無制約に生成した 2 つ組に対する接線交点を用いることから、ハフ空間での対応点の分散が大きくなり、ピーク検出が不安定になりがちなことである。このため、真の経線や側線に含まれるエッジ素の数がその他のエッジ素に対して小さい場合には正しい結果が得られない可能性が高くなる。また、画像中に SHGC が存在しない場合にも接線交点の分布からこれを判断することは困難である。以下に示すアルゴリズムでは、接線交点の拘束に加え、経線エッジ上の対応エ

ジ素に成立する他の拘束条件を用いて対応エッジ素の組を選別することにより、上述の問題点を解決する。

経線エッジ上の対応するエッジ素対が一组与えられた場合、経線拘束2を用いれば、その経線上のすべての対応するエッジ素対を限定することができる。このことから、端面エッジと経線エッジの交点を参照する対応エッジ素とし、経線エッジに沿った他の対応エッジ素の組を決定する。経線拘束3は接線交点の拘束と同様の拘束条件であり、必ずしも必要ではないが、多くのエッジ検出アルゴリズムでは、エッジ位置の検出精度がエッジ方向の検出精度よりも良いため、有用な拘束条件となる。これらより以下の手順で経線エッジが抽出される。

1. 端面エッジと経線エッジとの交点の候補を検出する。
2. 経線エッジの両端となる交点の組の候補を選択する。
3. 各交点の組を連結するエッジの経路を探索する。
4. すべてのエッジ経路の組に対して、
  - (a) 対応エッジ素対を検出する。
  - (b) 各対応エッジ素対での接線交点、延長線交点、変倍率を計算する。
5. エッジ経路の3つ組に対して、接線交点などの一致から不整合を検定する。
6. 不整合情報から経線エッジとして無矛盾なエッジ経路の組を得る。
7. 接線交点などから軸の直線性を検定し、これを満足する無矛盾なエッジ経路の組を経線エッジの組とする。

#### 4.2 経線エッジ候補の検出

エッジの外挿部分を計算して不完全なエッジを補い、端面エッジと経線エッジの交点候補を検出する。次いで、経線の両端となる交点の組の候補を以下のような拘束条件を用いて選択する。

- 1つの経線の両端となる交点对での端面エッジの接線方向は等しい。
- 1つの経線の両端となる交点对を通る延長線は物体の焦点を通過する。

第3に、連結可能なエッジを探索して、交点对をつなぐエッジ経路の候補を抽出する。図11に交点对の候補をそれらを結ぶ直線で示す。

#### 4.3 無矛盾な経線の組の選択

拘束条件に基づき互いに矛盾しない経線エッジ経路の組を検出する。第1に、経線エッジ候補の組に対

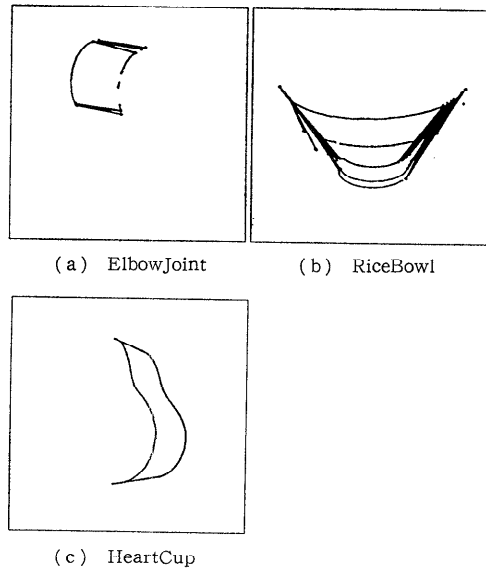


図11 経線の両端となる交点对の候補  
Fig. 11 Junction pairs for the ends of meridians.

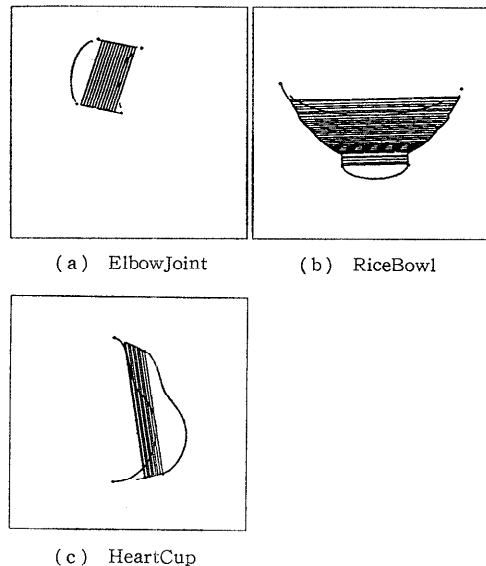


図12 経線上の対応エッジ素対  
Fig. 12 Corresponding points in meridian edges.

し、端面エッジと経線エッジの交点の位置から対応点間を結ぶベクトルの方向を計算し、両エッジ経路のエッジ素をこの方向へ投影することにより、対応するエッジ素対を得る。図12は得られた対応エッジ素対群をそれらを連結する線分で示している。この過程で同一のエッジを共有するエッジ経路や投影方向に対して

2重に対応点があるエッジ経路の2つ組は不整合セットに追加される。次いで、接線交点、延長線交点、変倍比を計算する。ここで、交点間の距離と対応エッジ素対間の距離の比として、それらを通る断面の変倍比が得られる。

1つのエッジ経路が共通となる2対のエッジ経路(M1, M2) (M1, M3) を考えた時、これらが経線エッジであるならば、各々から得られる接線交点群などは一致しなければならない。よって、接線交点などの差が十分小さくない場合には、3つのエッジ経路からなる組 (M1, M2, M3) が不整合セットに追加される。ここで、接線交点位置の差はエッジ経路上の各対応点での接線交点の位置を図5のセル分割と同様の考え方により非線形に変換した後に距離計算を行って得る。

(M1, M2, M3) や (M2, M4) などの不整合セットはこれらのエッジ経路のすべてが経線でないことを示すのではなく、いずれか1つ以上が経線でないことを示すに過ぎない。たとえば、上記の不整合セットに対して (M1, M2) や (M1, M3, M4, M5) は無矛盾な経線エッジ経路の候補となり得る。すべてのエッジ経路の組合せに対して不整合セットのテストを終えた後、無矛盾な解釈を与える経線エッジ経路の候補は、いかなる不整合セットも含まず、他の候補に内包されないエッジ経路の集合として選択される。これはビットベクトルに対する単純な比較論理演算で効率的に実装することができる。不整合セットをビットベクトル  $A$  で表すとす。例えば、6つの候補に対して (0, 2, 3) 番目の候補からなる不整合セットは  $[1, 0, 1, 1, 0, 0]$  となる。同様にテストするエッジ経路候補の組の仮説をビットベクトル  $B$ 、例えば  $[1, 1, 1, 0, 0, 1]$ 、とすると、これが  $A$  を含むかどうかは、 $\sim B \oplus B \otimes A = T$ 、で判定できる。ここで、 $\sim$ ,  $\oplus$ ,  $\otimes$ ,  $T$  はそれぞれ否定、論理和、論理積、真を示す。同様の方法は、仮説真実維持機構 (Assumption-based Truth Maintenance System) で用いられている。上記により、順に各ビットを 0/1 とした組合せを生成し、これを不整合セットを用いて刈り込むことで、最終的に無矛盾な解釈を与えるエッジ経路の組を得る。

この手法の計算量は原理的にエッジ経路の数の増加に伴い大きく増加するが、不整合セットがエッジ素の2つ組、3つ組であることから、エッジ経路の候補のほとんどが初期段階で刈り込まれ、実験に用いた画像 (エッジ経路候補 30 以内程度) に対する計算時間はあまり大きくない。

#### 4.4 誤差の正規化を考慮した最小自乗法による軸の決定

経線に対する最後の拘束条件は、その接線交点および延長線交点が一直線上に存在するというのである。最適な直線とそれからの誤差は最小自乗法により求める。ここで、接線交点などの位置の誤差は延長線の長さに従って拡大するため、以下のように誤差を正規化する。

延長線交点の位置誤差にはこれを決定するために用いた点  $P$  の位置の誤差の  $(l+l_0)/l_0$  倍が現れる (図13)。ここで、 $l_0$  は端面と経線の交点と点  $P$  の距離であり、 $l$  は延長線交点と点  $P$  の距離である。したがっ

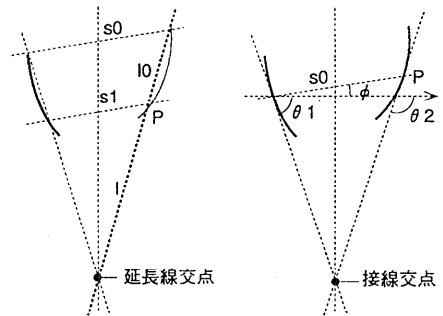


図13 接線交点および延長線交点における誤差のモデル  
Fig. 13 A model of error magnification in the position of intersections.

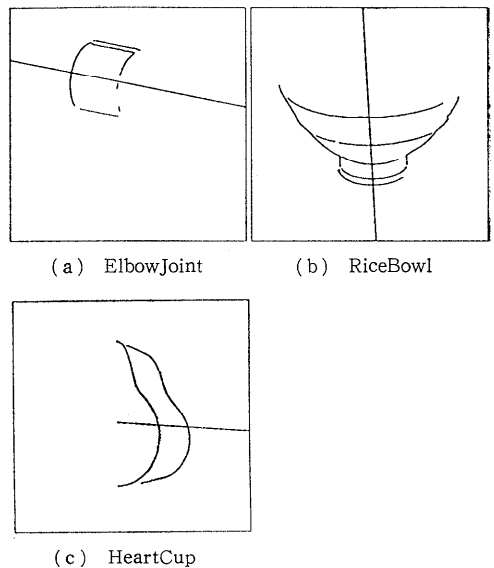


図14 検出された経線エッジと軸  
Fig. 14 Extracted meridian edges and their axes.



表 1 直線近似による正規化自乗誤差と無限遠焦点の比率

Table 1 Minimum and maximum squares errors and ratio of infinite foci.

Method	正規化自乗誤差		単純自乗誤差		無限遠焦点 比率
	最小誤差	最大誤差	最小誤差	最大誤差	
ElbowJoint: 図 14 (a)	0.08952	537.90	9081.7	6.2926 E6	0.580
RiceBowl: 図 14 (b)	0.13935	11.730	861.24	1.6723 E5	0.045
HeartCup: 図 14 (c)	0.02379	0.22385	371.24	2171.2	0.0

て、正規化された誤差  $\bar{e}$  は

$$\bar{e} = e \cdot l_0 / (l + l_0) = e \cdot (s_0 - s_1) / s_0$$

となる。ここで、 $s_0$  は参照交点間の距離、 $s_1$  は経線上の対応点間の距離である。誤差の正規化を考慮し最小自乗法は  $e^2$  の和ではなく  $\bar{e}^2$  の和を最小化するように計算する。同様に、接線交点の正規化誤差は以下のよう近似できる。

$$\bar{e} = e \frac{l_0 \cdot |\cos(\phi - \theta_2) - \cos(\phi - \theta_1)|}{s_0}$$

ここで  $\phi$  は経線上の対応点を結んだ直線の方向、 $\theta_1$  と  $\theta_2$  はエッジ素の方向、 $l_0$  はエッジ方向を計測する際に用いたエッジ弧の等価長さ、 $s_0$  はエッジ素間の距離である。

図 14 に本章で述べたアルゴリズムで検出した経線エッジ経路の組を示す。また、表 1 に正規化した場合、しない場合の平均自乗誤差を示す。正規化した場合、その誤差はエッジ素の位置誤差であり、交点が一直線上にある場合には 1 画素以下となる。一方、通常の最小自乗法では、誤差が増幅されている。ここで、SHGC と認められる場合はさらに、次の 3 つに分けられる。(i) 接線交点などが一直線上に分布する場合、(ii) 有限の一点に収束する場合、(iii) 無限遠点に収束する場合。これらは、それぞれ、非直線掃引関数、直線ただし定数でない掃引関数、定数掃引関数に対応する。無限遠点となる接線交点などの割合が十分大きい場合には (iii) と判定される。また、平均最大自乗誤差が 1 未満となる場合には (ii) と判定される。図 14 では、(a) は無限遠点であり、(b) は一直線上に分布、(c) は有限の一点に収束する。実際には、Shafer らが示しているように (ii) (iii) の場合には、一般円筒の軸は完全には制約されない。このため、図 14 では、断面の中心もしくは参照エッジの中点を通るように示されている。

## 5. おわりに

本論文では、エッジのグループ化の問題に対して、SHGC の構造エッジに存在する幾何学的拘束を利用

することにより、1 つの物体の両端面を構成するエッジの抽出を行うアルゴリズム、さらに抽出された端面エッジの情報を利用して経線エッジを抽出するアルゴリズムを構成し、背景などの多様なエッジを含む画像から単一物体を構成する構造エッジの組を抽出した。これらのアルゴリズムは、SHGC に分類されるすべての物体にあてはまる幾何拘束条件を用いているため、例えば断面と軸が直交しないような物体にも適用可能である。

実験によれば、実装したアルゴリズムのグループ化性能は比較的安定したものである。すなわち、検出結果はパラメータの微小な変動に対して急激に変化せず、ほとんどの場合、正しい対応は誤対応よりも高い対応画素比率を得る。これは、個々のエッジ素での計測値であるエッジ位置やエッジ方向の誤差をグループ化の際の拘束条件を緩やかな制限とすることで吸収し、エッジ全体としてこれらの拘束を積み重ねることにより多数決的な判定を行っているためと考えられる。また、本アルゴリズムは、図 9 に見られるように、複雑な対象画像中の物体から個々の一般円筒部分を切り出し得ることや分断されたエッジの集合を 1 つの構造エッジとして取り出せることなどの有用な性質を持つ。さらに、誤検出された端面エッジは経線エッジに支持されないため、全体として正しい結果を得るための強い拘束条件が得られている。

本手法の主な弱点は、(a) 計算量が大きいこと、(b) 経線エッジが観察されることが必要であること、(c) 構造エッジの隠されている部分が小規模でない場合、これを処理できないこと、である。

計算量の問題は大きく、本手法により原理的には多数の SHGC 物体を含む画像から個々の物体を切り出すことが可能であるが、現状においては計算時間を現実的な範囲に収めるためにあまり複雑な画像は扱うことができない。(本アルゴリズムはリスプマシン Symbolics 3600 にインプリメントされており、図 9 などの例で数時間程度を要する。) この問題に関しては、エッジ素ではなくエッジセグメントの代表点やエッジ

セグメントを近似した曲線を用いて端面エッジ抽出アルゴリズムを構成することにより大幅な改善が考えられる。このような前処理を安定した正確なものにすることも含めて今後の課題である。

第2の問題に関しては、経線エッジの代わりに物体の構成エッジとして必ず存在する側線エッジを利用することが可能であるが、これまで提案されている側線に対する拘束の利用方法<sup>11)</sup>には断面を構成するエッジの抽出が必要であり、より総合的なエッジのグループ化の検討を要する。

第3の問題に関しては、柔軟なボトムアップ/トップダウン処理の融合によりモデル知識をさらに有効活用する必要があると考えられる。

謝辞 本研究を進める機会を与えていただいた情報システム研究所田村秀行部長に感謝します。

### 参 考 文 献

- 1) Binford, T. O.: Visual Perception by Computer, *Proceeding, IEEE Conf. on Systems and Control* (1971).
- 2) Binford, T. O., Levitt, T. and Mann, W.: Bayesian Inference in Model-Based Machine Vision, *Proceedings, Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp. 73-95 (1987).
- 3) Brady, J. M. and Asada, H.: Smooth Local Symmetries and Their Implementation, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 36-60 (1984).
- 4) Brooks, R. A.: Symbolic Reasoning among 3 D Models and 2 D Images, *Artif. Intell.*, Vol. 17, pp. 285-348 (1981).
- 5) Mohan, R. and Nevatia, R.: Perceptual Organization for Segmentation and Description, *Proceedings, the Image Understanding Workshop*, pp. 415-424 (1989).
- 6) Nevatia, R. and Binford, T. O.: Description and Recognition of Complex Curved Objects, *Artif. Intell.*, Vol. 8, pp. 77-98 (1977).
- 7) Ponce, J., Chelberg, D. and Mann, W.: Invariant Properties of Straight Homogeneous Generalized Cylinders and Their Contours, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 11, No. 9, pp. 951-966 (1989).
- 8) Saint-Marc, P. and Medioni, G.: B-spline Contour Representation and Symmetry Detection, Technical Report IRIS 262, University of Southern California (1990).
- 9) Sato, H. and Binford, T. O.: BUILDER-I: A System for the Extraction of SHGC Objects in an Edge Image, *Proceedings, the Image Understanding Workshop*, pp. 779-791 (1992).
- 10) Shafer, S. A. and Kanade, T.: The Theory of Straight Homogeneous Generalized Cylinders, Technical Report CS-083-105, Carnegie-Mellon University (1983).
- 11) Ulupinar, F. and Nevatia, R.: Recovering Shape from Contour for SHGCs and CGCs, *Proceedings, the Image Understanding Workshop*, pp. 544-556 (1990).
- 12) 小泉, 富田: 階層的な形状プリミティブの並列的発見, 情報処理学会研究会資料, CV 69-1 (1990).
- 13) 徐, 田中, 辻: 対称的断面を持つ一般円柱の三次元復元, 情報処理学会研究会資料, CV 73-7 (1991).

(平成4年6月26日受付)

(平成4年12月10日採録)

#### 佐藤 宏明 (正会員)



昭和35年生。昭和57年東京大学工学部産業機械工学科卒業。同年キヤノン(株)入社。平成元年から3年までスタンフォード大学ロボティクス研究所客員研究員。現在、キヤノン(株)情報システム研究所勤務。画像処理システム・知識ベースシステムの研究に従事。

#### トーマス ビンフォード



1965年ウィスコンシン大学 Ph. D. 現在、スタンフォード大学コンピュータサイエンス学科ロボティクス研究所教授。ACRONYM, SUCCESSOR等のモデルベースドビジョンシステムを始めとするコンピュータビジョンシステム、医用画像システム、知能ロボット、画像処理等の研究に従事。