

## Smoothed Local Generalized Cones: 3次元形状の自然軸抽出のモデル

佐藤 嘉伸 大谷 淳 石井 健一郎

NTT ヒューマンインタフェース研究所

あらまし 距離画像から視点に依存しない3次元形状記述を復元する方法を述べる。本稿では、形状記述のための基準座標軸（自然軸）を推定するための Smoothed Local Generalized Cones (SLGCs) と呼ぶ新しいモデルを提案する。まず、“局所”一般化円筒の当てはめによって局所軸の拘束を得る。次に、局所軸の拘束、局所一般化円筒の当てはめ具合、および、軸のなめらかさを基準にした大局的最適化によって局所軸を統合し、自然軸を抽出する。SLGCに基づく処理は、変形モデル (deformable model) の直接的当てはめに比べ、非線形最適化を含まないので、安定な自然軸の抽出が可能である。また、大局的一般化円筒を用いるアプローチと比べ、局所モデルを利用することによる柔軟性によって多様な形状に適用できる。さらに、抽出された自然軸に基づいて、変形表面 (deformable surface) を当てはめる際の適切な parameterization を容易に決定できる。これにより、変形表面の当てはめ問題を線形最小2乗問題に帰着させることができるので安定な形状復元が可能になる。距離画像に対する実験結果によって有効性を実証する。

## Smoothed Local Generalized Cones: A Model for Extracting Natural Axis of 3D Shape

Yoshinobu Sato, Jun Ohya, and Kenichiro Ishii

NTT Human Interface Laboratories

E-mail: sato@nttcvg.ntt.jp

1-2356, Take, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken, 238-03, JAPAN

**Abstract** The goal of this work is to recover viewpoint-independant descriptions of 3D shapes from 2.5D images. In this paper, we propose a novel 3D shape representation called the *Smoothed Local Generalized Cones*(SLGCs), which can extract natural axes to describe shapes in their canonical frames. First, local constraints of a fragment of a natural axis are derived from fitting the local generalized cone (LGC). Next, the long and smooth natural axes are extracted through global optimization based on the constraints from LGC fitting, goodness-of-fit of the LGCs, and smoothness of natural axis. Our approach, which does not involve non-linear optimization, is stable as contrasted with the direct fitting approach of the deformable models, and adaptable to a variety of shapes through the use of local models as contrasted with using global generalized cones. Moreover, based on the extracted natural axis, natural parametrization of the object surface can be determined. Using this parameterization, the deformable surface fitting problem is formulated as a linear least square problem. Therefore, stable shape recovery is possible. We present recovery experiments involving real 3D range images.

## 1 まえがき

視点に不変な（あるいは、物体中心の）3次元形状記述の復元は、物体認識に利用する上で、あるいは、形状モデルを獲得する上で、重要な課題の1つである[1]。視点に不変な形状記述の復元において、2つの副課題がある。1つは、記述を行なうための基準座標系の“位置決め(localization)”（位置・姿勢パラメータの計算）であり、もう1つは、その座標系における形状の“復元(reconstruction)”（形状パラメータの計算）である。座標系の決定においては、位置・姿勢を安定に決定するための十分な幾何学的拘束（安定性）を必要とし、形状記述においては、多様な形状の記述に適應できる十分な自由度をもつ表現（適應性）を必要とする。この課題の困難さは、上記の2つの要求を同時に満足させる必要があることに起因する。

ビジョン研究においては、この課題に関して、古典的な一般化円筒[2][3][4]から、最近の超楕円体(superquadrics)[5][6]や変形表面(deformable surface)モデル[7]などの変形モデル(deformable model)に至るまでの長い研究の歴史がある。変形モデルは、ダイナミクスを組入れ、動きの解析にも利用できるモデルとして魅力的である。しかし、変形モデルの直接当てはめによる形状復元は、多変数の非線形最適化問題となる。このような非線形最適化にすべてを委ねる方法は安定性に問題がある。変形モデルを用いるアプローチの困難さは、座標系の位置決めと形状の復元の同時解決を試みることに起因する。ここで、重要な点は、座標系の位置決めを適切に行なうことができれば、形状復元は、容易な問題となるということである。すなわち、視点に不変な形状復元問題の本質は、形状復元よりもむしろ、形状を記述するための適切な基準座標軸の発見にある。一方、一般化円筒を用いるアプローチは、形状が与えられて、もとの軸を復元することに重点をおく。一般化円筒の復元では、近年、一般化円筒モデルと局所幾何特徴のエlegantな関係の発見に重点が置かれている[4][3]ので、根拠のしっかりしたアルゴリズムを導くことができる。しかし、Elegantな関係が発見できるクラスは非常に限られており、実世界の形状への適應性に問題がある。一般化円筒軸の復元の困難さは、軸復元の問題が逆問題として定式化されることに起因する。元来、一般化円筒は、“形状生成指向”モデル、即ち、軸を与えて生成される形状を定義するモデルであるので、形状が与えられて軸を復元する問題は、逆問題となり、困難な問題となるのは当然といえる。RosenfeldとPonceの最近の解析[8][9]は、2次元一般化円筒に関してこの点を明らか

にしている。

本研究では、安定な復元と実世界の形状への適應性の両立を目指した距離画像からの3次元形状記述のアプローチを提案する。形状自体によって定まる座標軸（本稿では、“自然軸”と呼ぶ）を復元するための局所モデルとして、“局所”一般化円筒を導入する。局所一般化円筒をデータ中のあらゆる局所領域に当てはめることにより、局所的な軸の拘束を得る。得られた拘束、一般化円筒の当てはめ具合に基づき、大局的最適化によって、なめらかに連結可能な局所軸の系列を抽出する。2次元形状記述のためのSmoothed Local Symmetries (SLSs)[10]（局所対称に基づき抽出した局所軸をなめらかに連結する）との類推から本手法を、Smoothed Local Generalized Cones (SLGCs)と呼ぶ。ここで提案するモデルでは、曲線軸を許容し、かつ、柔軟な局所一般化円筒モデルを用いることにより、広いクラスの形状に関して自然軸の抽出が可能である。また、非線形最適化処理を伴わず、安定な復元が行なえる。

以下では、まず2章で、本研究で用いる局所一般化円筒モデルのクラスとその3次元表面の断面に対しての当てはめについて述べる。当てはめの際、局所面対称の拘束を用いて、当てはめの位置と方向を制約し、探索量を実用的なレベルに抑える。3章では、まず、局所一般化円筒から得られる局所軸に関する拘束について述べ、次に、局所一般化円筒の拘束を満たし、かつ、長くなめらかに連結した局所軸の系列を大局的最適化によって抽出する方法を述べる。4章では、抽出された自然軸に基づき、変形表面の当てはめを線形最小2乗法によって行う方法について述べる。5章では、実距離画像に対する実験結果を示す。

## 2 局所一般化円筒の当てはめ

SLSでは、2D輪郭上の2点が局所対称条件を満たす場合に、その2点の midpoint を軸とする(図1)。輪郭上の $n$ 個の各点に対して、 $k$ 方向の軸を仮定して、 $O(kn)$ の探索を行なうことによって、各点での局所軸を抽出する。

3D形状の場合は、3D表面の断面形状が、ある拘束条件を満たす場合に、切断平面上のある点を局所軸とするのが適当である。その拘束条件として“局所”一般化円筒を用いる。本研究では、次式で表される直交する2方向に対して異なる拡大・縮小を許すStraight Bilinear Generalized Cones (SBGC)[3]を用いる(図

2)。

$$\mathbf{X}(s, z) = ((az + 1)x(s), (bz + 1)y(s), z) \quad (1)$$

ここで、 $(x(s), y(s))$  は断面関数であり、 $a$  と  $b$  は、それぞれ、 $x$ -軸と  $y$ -軸に対する掃引関数の傾きである。SBGC は、SBGC 表面の  $x$ -座標が 0 となる  $x$ -稜線 ( $x$ -apex)、および、 $y$ -座標が 0 となる  $y$ -稜線 ( $y$ -apex) によって特徴づけられる。式 (1) の SBGC では、 $x$ -稜線は、直線  $x = 0, z = -1/a$  で与えられ、 $y$ -稜線は、直線  $y = 0, z = -1/b$  で与えられる。

SBGC の表面法線は  $\mathbf{n}(s, z) = \mathbf{X}_s \times \mathbf{X}_z / |\mathbf{X}_s \times \mathbf{X}_z|$  で与えられ、 $\mathbf{X}_s$  と  $\mathbf{X}_z$  の外積は次式となる：

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_s \times \mathbf{X}_z = & \\ & ((bz + 1)y_s(s), \\ & -(az + 1)x_s(s), \\ & bx_s(s)y(s)(az + 1) - ax(s)y_s(s)(bz + 1)). \end{aligned} \quad (2)$$

断面上 (即ち、 $z = 0$  のとき) の表面法線を  $(\alpha(s), \beta(s), \gamma(s))$  とすると、次式の拘束が導かれる：

$$\gamma(s) + by(s)\beta(s) + ax(s)\alpha(s) = 0. \quad (3)$$

3D 表面上のある点に対して、その点を原点とするある仮の座標系を考え、 $xy$ -平面を切斷平面として断面形状を抽出する (図 3)。仮の座標系における断面のデータ位置、および、法線の測定値を、それぞれ、 $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, 0)$ 、 $\mathbf{n}_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 、とする。 $(\rho_x, \rho_y)$  を  $xy$ -平面上の軸の位置とすると、 $(x(s), y(s)) = (x_i - \rho_x, y_i - \rho_y)$  であるので、断面上の 1 点での位置データと法線データから次の拘束が得られる：

$$v_i = ax_i\alpha_i - a\rho_x\alpha_i + by_i\beta_i - b\rho_y\beta_i + \gamma_i = 0. \quad (4)$$

$a, a\rho_x, b, b\rho_y$  を推定すべきパラメータとみなすと、モデル関数は線形となり、断面上の全データを当てはめに用いる場合、最小 2 乗条件は次式で与えられる：

$$S(a, a\rho_x, b, b\rho_y) = \sum_i v_i^2 = \min. \quad (5)$$

残差  $v_i$  の標準偏差が十分小さい場合、SBGC モデルが断面上のデータに当てはめ可能と結論できる。

3D 表面の各点に対して、あらゆる向き (3 自由度) の仮の座標系を設定して、SBGC の当てはめを行なうと、 $n$  点に対して、1 自由度あたり  $k$  段階の離散化を行なうとして、 $O(k^3n)$  の探索が必要となる。この計算量は莫大であるので、軸の位置と方向を制約する他の拘束条件を組み合わせる必要がある。そこで、3D

表面上の局所対称性に着目する (図 4)。局所一般化円筒の座標系の 1 つの座標平面が局所対称面に一致するように設定されると仮定することはきわめて妥当な拘束であると考えられる。これによって、当てはめを行なう点を、3D 表面上の局所対称曲線 [11] 上の点に制約する。さらに、局所対称面の法線を  $x$ -軸に一致させ、局所軸 ( $z$ -軸) の方向は局所対称面の法線方向 ( $x$ -軸) に垂直な方向 (即ち、回転を  $x$ -軸回り) に、局所軸の位置は局所対称面 ( $yz$ -平面) 上に限定することができる (図 5)。この場合、局所対称曲線上の  $m$  ( $m \ll n$ ) 点において、局所対称面の法線に垂直なあらゆる向き (1 自由度) に探索を行なうので、計算量は  $O(km)$  となる。

### 3 自然軸の抽出

$O(km)$  探索によって得られた局所 SBGC の集合に基づき、自然軸としてふさわしい系列を抽出する。対称曲線上の各点  $i$  において、SBGC 当てはめを行なった  $k$  方向のうちの 1 方向  $\theta_i$  の局所一般化円筒を選択する問題として定式化できる。

#### 3.1 局所一般化円筒から得られる局所軸に対する拘束

局所一般化円筒の当てはめは、離散化した  $k$  段階の方向で行われる。しかし、局所軸の位置は、SBGC の  $y$ -稜線の  $z$  座標が大きい場合、当てはめの際の  $z$ -軸方向の僅かの角度変化で大きな位置変化を伴う。物体表面が当てはめ断面の近傍で同一の  $y$ -稜線で特徴づけられると仮定する。図 6 に示すように、平面  $z = 0$  平面で切斷された断面に当てはめられた SBGC の  $y$ -稜線が  $yz$ -平面を突き抜ける位置を  $(y_a, z_a)$  とすると、切斷平面上の局所軸の位置は  $(y_a, 0)$  である。平面  $z = y \tan \theta$  で切斷された断面に当てはめられた SBGC が同じ  $y$ -稜線で特徴づけられるとすると、切斷平面上の局所軸の位置は  $(y_a, z_a)$  から、 $z = y \tan \theta$  におろした垂線の足であり、 $(\cos \theta (a_y \cos \theta + a_z \sin \theta), \sin \theta (a_y \cos \theta + a_z \sin \theta))$  となる。 $\theta \simeq 0$  の場合、近似的に  $(a_y + a_z, 0)$  となる。よって、 $a_z$  の値が大きいとき、局所軸は大きな位置変化を伴うので、離散的な角度で得られた局所軸を滑らかに接続することは困難である。よって、局所軸の連結処理では、離散方向で得られた局所軸の位置を用いるのではなく、局所 SBGC の  $y$ -稜線の座標による局所軸の方向と位置の拘束を用い、連続方向を考慮に入れる必要がある。

### 3.2 大局的最適化による自然軸の抽出

離散方向で得られた局所 SBGC の  $y$ -稜線の座標による拘束を満たし、局所 SBGC 当てはめ残差が小さく、かつ、なめらかに連結できる局所軸の系列を抽出するアルゴリズムを定式化する。連続的な方向角を考え、離散方向  $\theta_i$  で当てはめられた SBGC と  $\theta_i \pm \Delta\theta$  の範囲での SBGC が同じ  $y$ -稜線をもつと仮定し、 $\theta_i + \delta\theta_i$  (ただし、 $|\delta\theta_i| < \Delta\theta$ ) のときの局所軸の位置を  $\mathbf{X}_i(\theta_i, \delta\theta_i)$  と表す。求めるべき系列は、対称曲線上での各点での当てはめ方向角、および、微小オフセット角の系列  $(\theta_1, \delta\theta_1), (\theta_2, \delta\theta_2), \dots, (\theta_m, \delta\theta_m)$  であり、コスト関数は、

$$\begin{aligned} E &= \sum_i E_1(\mathbf{X}_{i-1}, \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1}) \\ &= \sum_i \{w_1(1 - N[\mathbf{X}_{i+1} - \mathbf{X}_i] \cdot N[\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_{i-1}]) \\ &\quad + w_2(1 - N[\mathbf{X}_{i+1} - \mathbf{X}_{i-1}] \cdot \mathbf{u}_i) + r_i\} \quad (6) \end{aligned}$$

と設定できる。ただし、 $N[\mathbf{x}] = \mathbf{x}/|\mathbf{x}|$ ,  $\mathbf{u} = (-\sin(\theta + \delta\theta), \cos(\theta + \delta\theta))$ ,  $r_i$  は  $\theta_i$  での当てはめ時の残差、 $w_1$ ,  $w_2$  は重み係数である。第 1 項はなめらか拘束、第 2 項は局所軸方向との整合性を表す (図 7)。

一般に、局所モデルから得られる断片的要素を大局の実体に統合する際に問題となるのは、偽のデータやデータの欠如に対する耐性である。また、対称曲線に沿った表面が 1 本の自然軸で記述されない場合もある。そのような問題に対処するため、軸の切断を許す一種のライン過程を組み込む。即ち、 $\mathbf{X}_i$  に、局所軸の位置と方向の他に、切断点を表すラベル (*Nil*) の割当てを許し、これに対して一定のコスト *Const* を課す。ライン過程付きコスト関数は (6) 式の  $E_1(\mathbf{X}_{i-1}, \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1})$  を次式で置き換えることにより得られる。

$$E_2(\mathbf{X}_{i-1}, \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1}) = \begin{cases} \text{Const} & \mathbf{X}_{i-1}, \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1} \text{ のいずれかが } Nil \\ E_1(\mathbf{X}_{i-1}, \mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1}) & \text{それ以外} \end{cases} \quad (7)$$

これにより、大局的に整合のとれる局所的証言がない場合に、*Nil* を割り当て、強引に連結処理を行うことを阻止する。以上のコスト関数は、動的計画法によって効率良く最適化できる。

### 4 変形表面の当てはめ

自然軸に基づく変形表面モデル [7]  $\mathbf{X}(s, t) = (x(s, t), y(s, t), z(s, t))$  の当てはめについて述べる。ここで、 $s \in [0, 1]$ ,  $t \in [0, 1]$  とし、 $\mathbf{X}(s, t)$  は、 $\mathbf{X}(0, t) =$

$\mathbf{X}(1, t)$  を満たす筒状の表面とする。最小化すべき汎関数  $E(\mathbf{X})$  は、変形表面の持つ規則性を表すモデル内拘束  $E_M(\mathbf{X})$  とデータと変形表面との整合を表すデータ拘束  $E_F(\mathbf{X})$  の和として、次式で与えられる。

$$E(\mathbf{X}) = E_M(\mathbf{X}) + E_F(\mathbf{X}) \quad (8)$$

自然軸を基準として、3 次元点データの変形表面座標への写像 (変形表面の parameterization) を決定することによって、この汎関数の最小化問題は、線形最小 2 乗問題となる。

モデル内拘束  $E_M(\mathbf{X})$  は、変形拘束  $E_D(\mathbf{X})$ 、面対称拘束  $E_S(\mathbf{X})$ 、および、筒状表面の終端を 1 点に収束させる終端拘束  $E_T(\mathbf{X})$  の各拘束の和とする。以下に、それぞれの拘束を示す。

$$E_D(\mathbf{X}) = \int_0^1 \int_0^1 w_{1,0} |\mathbf{X}_s|^2 + w_{0,1} |\mathbf{X}_t|^2 + w_{2,0} |\mathbf{X}_{ss}|^2 + w_{1,1} |\mathbf{X}_{st}|^2 + w_{0,2} |\mathbf{X}_{tt}|^2 ds dt \quad (9)$$

$$E_S(\mathbf{X}) = w_s \int_0^1 \int_0^1 |\mathbf{X}(s, t) - \mathbf{X}(1-s, t)|^2 ds dt \quad (10)$$

$$E_T(\mathbf{X}) = w_t \int_0^1 |\mathbf{X}(s, 0)_s|^2 + |\mathbf{X}(s, 1)_s|^2 ds \quad (11)$$

一方、データ拘束は、

$$E_F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{n_i} (\mathbf{X}(s_i, t_i) - T(\mathbf{X}_i))^2 \quad (12)$$

で表される。ここで、 $T$  はセンサ座標系から物体座標系への変換である。物体座標系は、自然軸を  $z$ -軸、局所一般化円筒の断面のうち、局所対称面の法線方向を  $x$ -軸、局所対称面に含まれる軸を  $y$ -軸とする座標系である (図 8)。各データ  $\mathbf{X}_i$  と表面座標パラメータ  $(s_i, t_i)$  の対応は、物体表面の一般化円筒近似をもとに、以下の手順で決定する。まず、自然軸の中央点での断面形状を 2 次元変形輪郭  $\mathbf{C}(s) = (c_x(s), c_y(s))$  を用いて推定する。図 9 に示すように、各輪郭データ  $\mathbf{C}_i$  と輪郭パラメータ  $s_i$  の対応は、輪郭データ系列  $\mathbf{C}_i$  の各点間の距離に基づいて決定する。 $\mathbf{C}(s)$  の推定は、変形拘束と対称性拘束を組み込んだ汎関数

$$\begin{aligned} E(\mathbf{C}) &= \sum_{i=1}^{n_c} (\mathbf{C}(s_i) - \mathbf{C}_i)^2 \\ &\quad + \int_0^1 w_1 |\mathbf{C}_s|^2 + w_2 |\mathbf{C}_{ss}|^2 ds \\ &\quad + w_s \int_0^1 |\mathbf{C}(s) - \mathbf{C}(1-s)|^2 ds \quad (13) \end{aligned}$$

の最小化を行なうことにより行なう。次に、物体表面を輪郭  $\mathbf{C}(s)$  を断面関数とする一般化円筒で近似し、

自然軸に沿った、 $x$ -方向と $y$ -方向の拡大縮小関数  $m_x(z)$  と  $m_y(z)$  を決定する。最後に、 $T(\mathbf{X}_i) = (x_i, y_i, z_i)$ 、 $\mathbf{C}(s) = (c_x(s), c_y(s))$  として、次式で各  $T(\mathbf{X}_i)$  に対する  $(s_i, t_i)$  を決定する。

$$\begin{aligned} s_i &= \arg \min_j \{ |x_i - m_x(z_i) x_c(s)|^2 \\ &\quad + |y_i - m_y(z_i) y_c(s)|^2 \} \\ t_i &= z_i \end{aligned} \quad (14)$$

数値計算の利便性を考慮して、 $\mathbf{X}(s, t)$  は、次式のようにユニフォームな双3次式B-スプライン曲面で表現する。

$$\mathbf{X}(s, t) = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \mathbf{a}_{ij} B_{ij}(s, t) \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{a}_{ij}$  は係数ベクトル、 $B_{ij}(s, t)$  はB-スプライン基底関数である。 $\mathbf{C}(s)$  も同様に、ユニフォームな3次式B-スプライン曲線で表現する。汎関数  $E(\mathbf{X})$  の各拘束は、係数ベクトルの線形結合の2乗和で表すことができるので、当てはめ問題は、関数  $E(\mathbf{a}_{1,1}, \mathbf{a}_{1,2}, \dots, \mathbf{a}_{m_1, m_2})$  を最小にする係数ベクトルを推定する線形最小2乗問題に帰着される。

## 5 実験結果

本研究のアプローチを Silicon Graphics Personal IRIS 4D/35G 上に実現し、実距離画像に対して実験を行った。最初の2つは全方位型3次元形状入力装置 [12] によって獲得した形状から視点を与え、通常のカメラ座標での  $128 \times 128$  の距離画像を生成したもので、ある意味で半生成画像である。最後の1つは、スリット光投影型距離画像スキャナ [13] によって入力した。サイズは  $128 \times 120$  である。

実験において、対称曲線上の各点における局所一般化円筒の当てはめ方向は64段階とし、また、自然軸抽出における式(6)、および、式(7)のコスト関数の各パラメータは、それぞれ、 $w_1 = 5.0$ ,  $w_2 = 1.0$ ,  $Const = 0.1$  と設定した。また、変形表面の当てはめ時のパラメータは、それぞれ、 $w_{1,0} = 1.0$ ,  $w_{0,1} = 0.5$ ,  $w_{2,0} = 0$ ,  $w_{1,1} = 0$ ,  $w_{0,2} = 0$ ,  $w_s = 10.0$ ,  $w_t = 10.0$  と設定した。B-スプラインの節点は  $16 \times 32$  である。今回の実験で用いた形状はすべて、大局的対称面をもつ物体を用いたので、対称曲線は、入力形状の大局的対称面による切り口として抽出した。

図10～12の各(a)は、入力距離画像の陰影表示であり、表面上の黒線は検出された対称曲線である。図10はマウス、図11は洗剤ボトル、図12は電話の

受話器である。各(b)は、大局的最適化によって抽出された自然軸である。自然軸、および、3次元点データを大局的対称面に投影して表示している。これらの結果から Smoothed Local Generalized Cones に基づく自然軸の特徴が理解できる。図11のように、形状の中央をつき抜ける場合もあるが、図10や12のように、形状の表面上、あるいは、底面に自然軸が抽出される場合もある。これらは、局所一般化円筒の系列として、最も長くなめらかなものであり、変形表面の当てはめにおいて、変形表面の自然な parameterization をもたらす。また、図11では、ライン過程による軸の切断がみられる。これは、雑音の影響により途中の局所情報が大局的に整合のとれたものでなかったことに起因すると考えられる。各(c)は、抽出された自然軸のうち最も長いものを抽出し、外挿、および、スプライン近似を行ったものである。この軸( $z$ -軸)と対称面の法線方向( $x$ -軸)で定義される座標系を物体座標系とする。各(d)は変形表面を当てはめた結果のステレオ表示である。黒線は、自然軸と対称面を表す。表面上のメッシュが変形表面の parameterization を表す。図10では、角がやや丸められているが、これは、スプラインの節点数の不足によるものである。

## 6 むすび

距離画像から視点に不変な物体中心の座標軸を抽出する方法を提案した。局所一般化円筒当てはめによって局所軸の拘束を導き、大局的最適化によって、なめらかな自然軸を抽出する方法を述べた。さらに、抽出された自然軸に基づく parameterization によって、変形モデルの当てはめは線形最小2乗問題として定式化された。局所モデルを用いることによって、多様な形状に対して適用可能であり、かつ、非線形最適化を含まないので、安定に、自然軸の抽出、および、形状復元が行なえる。実験によって、抽出される軸の視点に対する不変性はおおむね確認しているが、今後、その定量的評価を行なう予定である。さらに、自然軸に基づく正規化された記述を基に、物体認識への応用も試みる。

謝辞：本研究をサポートしていただいた遠藤隆也マルチメディア処理研究部長、小林幸雄音声情報研究部長、および、有益な助言を賜った尺長健主幹研究員、間瀬健二主任研究員、および、渡部保日児主任研究員、距離画像入力に協力頂いた安野貴之社員に感謝致します。

参考文献

- [1] Marr, D, Vision, San Francisco, Freeman (1982).
- [2] Nevatia, R and Binford, T.O.: Description and Recognition of Curved Objects, *Artificial Intelligence*, 8, 1, 77-98 (1977).
- [3] Shafer, S.A.: Shadows and Silhouettes in Computer Vision, Kluwer Academic Publishers.
- [4] Ponce, J., Chelberg, D. and Mann, W.B.: Invariant Properties of Straight Homogeneous Generalized Cylinders and Their Contours, *IEEE Trans., PAMI-11*, 9, 951-966 (1990).
- [5] Pentland, A.P.: Recognition by Parts, *Proc. of ICCV '87* (1987)
- [6] Solina, F. and Bajcsy, R.: Recovery of Parametric Models from Range Images: The Case for Superquadrics with Global Deformations, *IEEE Trans., PAMI-12*, 2, 131-146 (1990).
- [7] Terzopoulos, D. Witkin, A, and Kass, M.: Symmetry-Seeking Models for 3D Object Reconstruction, *Proc. of ICCV '87* (1987)
- [8] Rosenfeld. A. Axial Representations of Shape, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 33, 156-173 (1986).
- [9] Ponce, J. On Characterizing Ribbons and Finding Skewed Symmetries, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 52, 328-340 (1986).
- [10] Brady, M and Asada, H.: Smoothed Local Symmetries and Their Implementation, *International Journal of Robotics Research*, 3, 3, 36-60 (1984).
- [11] 佐藤、大谷: 物体認識のための3次元形状表現に関する基礎検討: 3次元形状の面対称特徴の抽出, 1990秋季信学全大, D-414 (1990).
- [12] Suenaga, Y. and Watanabe, Y: A Method for the Synchronized Acquisition of Cylindrical Range and Color Data, *IAPR Workshop on MVA*, pp137-141(1990).
- [13] Sato, K. and Inokuchi, S.: Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask, *Proc. of ICCV '87* (1987).

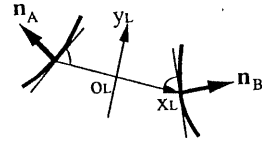
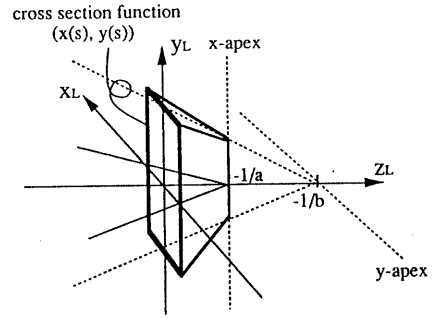


図1 2D局所対称によって定まる局所座標軸



$X(s,z) = ((az+1)x(s), (bz+1)y(s), z)$   
 図2 Straight Bilinear Generalized Cone

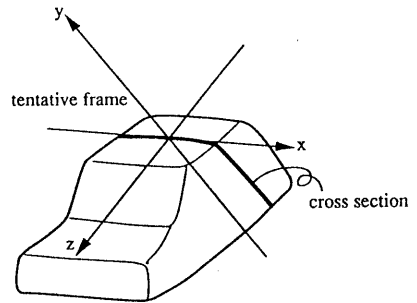


図3 板の座標系のxy-平面で切断される断面

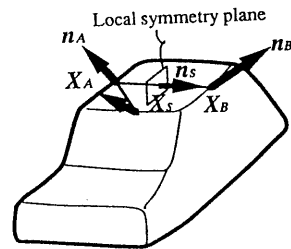


図4 局所対称: 2点 $X_A, X_B$ における法線を $n_A, n_B$ としたとき、 $(n_A + n_B)(X_A - X_B) = 0$ ,  $(n_A - n_B) = \lambda(X_A - X_B)$ を満足するとき、局所対称性が成立し、対称点 $X_s = (X_A + X_B)/2$ , 対称面法線 $n_s = (X_A - X_B)/(|X_A - X_B|)$ が定まる。

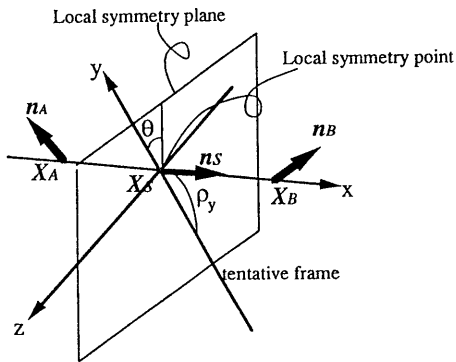


図5 局所対称面による仮の座標系の拘束：局所一般化円筒当てはめのための仮の座標系は原点を対称点とし、回転を対称面法線回りの回転 $\theta$ に拘束する。局所一般化円筒の当てはめによって、 $\rho_y$ が決定される。 $\rho_x$ は0である。

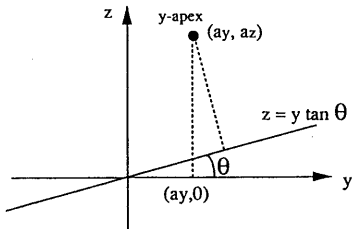


図6 局所一般化円筒のy-稜線と局所軸の位置

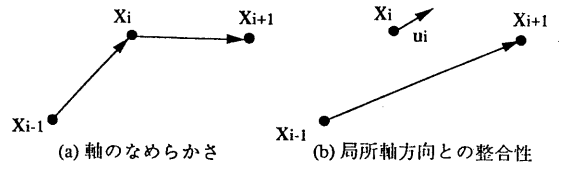


図7 最適化過程に組み込む拘束

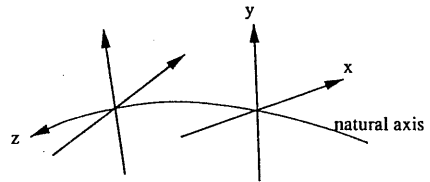


図8 物体座標系

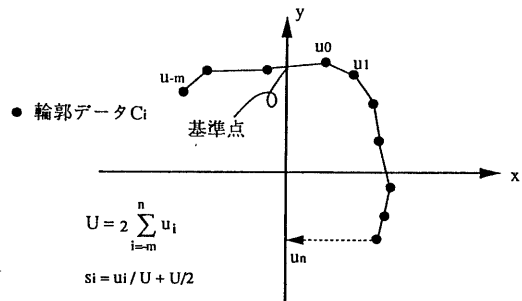
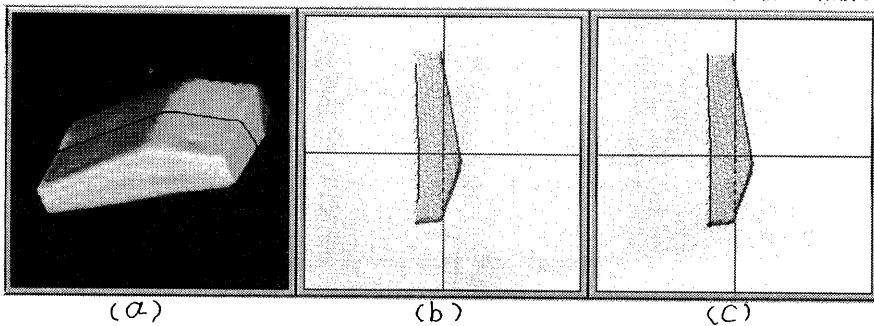


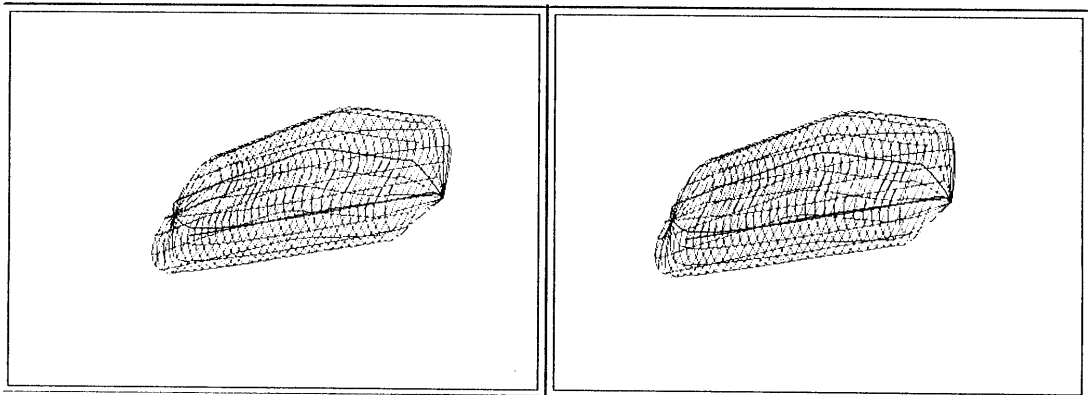
図9 輪郭データと輪郭パラメータの対応付け：上式によって各点での輪郭パラメータ $s_i$ の値を決定する。 $u_i$ は各データ点の基準点からの矢印の方向を正方向として輪郭に沿って累積した距離である。



(a)

(b)

(c)

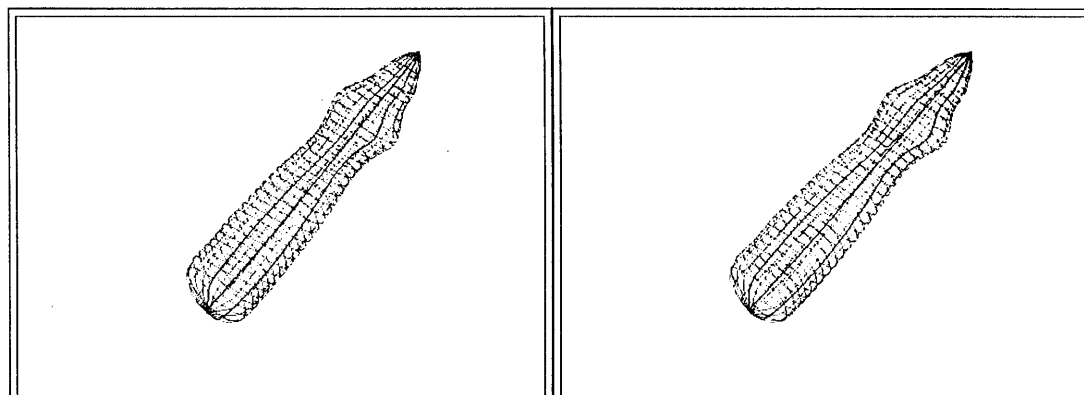
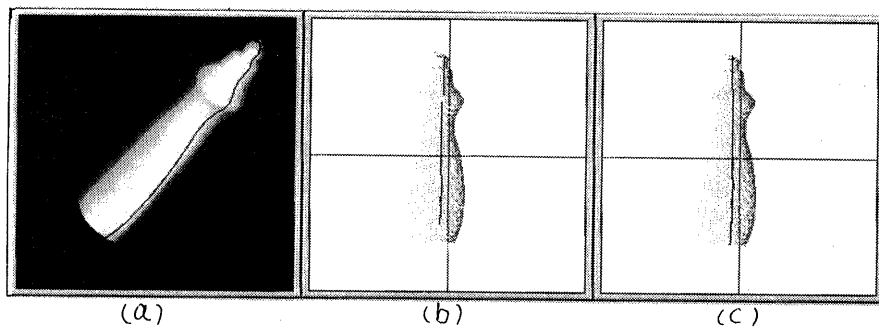


右画像

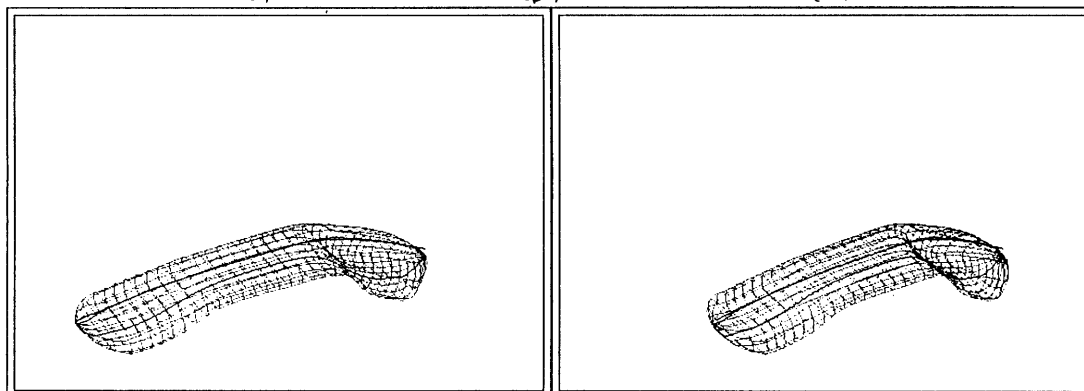
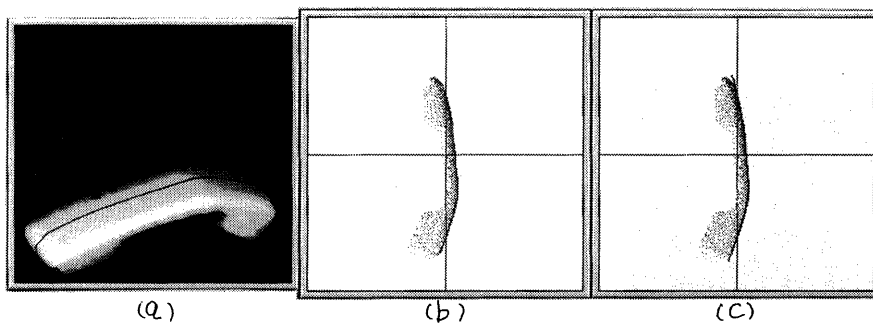
(d)

左画像

図10 マウス画像の実験結果



右画像 (d) 左画像  
 図11 洗剤ブラシ画像の実験結果



右画像 (d) 左画像  
 図12 電話受話器画像の実験結果