

物体の次元性と方向性

井宮 淳 中居大輔 市川 薫

千葉大学 工学部 情報工学科

現実に存在する物体は、棒のように1つの方向に伸びている物体、板のように2次的に2つの方向に広がっている物体、サイコロのように3次的に3つの方向にほぼ均等に広がっている物体、の3種類に大別することができる。物体の広がりの方角を示す性質を物体の方向性と呼ぶことにする。そして、広がり厚みを物体の次元性と呼ぶことにする。

本論文では、3次元に存在する自然物の認識・理解の数理的性質を解明する手始めとして物体のおおよその構造を理解・認識する計算モデルを提案する。まず、物体のモーメント行列の固有値・固有ベクトルを利用して物体の大局的構造としての物体の方向性と次元性とを定義する。そして、Ojaの主成分解析機を改良して、物体表面の計測情報から物体の重心、モーメント行列の固有値・固有ベクトルを同時に計算する算法を提案し、物体の次元性と方向性とを計算する機構を構成する。さらに、数値情報の量子化と記号化との関係を明確にし、計算結果を量子化して物体の大局的構造を記号化する機構を構成する。

Stochastic Method for Structure Analysis of Three-Dimensional Texture

Atsushi IMIYA, Daisuke NAKAI, and Akira ICHIKAWA

Dept. of Information and Computer Sciences, Chiba University

1-33 Yayoi-cho, Inakge-ku, Chiba 263 JAPAN

e-mail imiya@ics.tj.chiba-u.ac.jp

This paper gives a computational model to answer mathematically the problem why we feel plates are flat and potatoes are lump, using properties of the mechanical moment. Furthermore, we also give a machine which compute the dimensions and directions of objects in the three-dimensional real world. Our machine is based on PCA of Oja since PCA in the three-dimensional Euclidean space derives principal directions of the mechanical moment of object. The machine observes objects in the environment and computes geometrical parameters of objects. Moreover, the machine transforms geometrical parameters to symbols for making concepts of the environment.

1. まえがき

人間が物体を認識するとき、物体の空間配置に関する大局的構造が重要な働きをしていることが推測できる。世の中に存在する物体には、人工物のようにほとんどが直線と平面で構成されていてある程度の規則性があり、比較的簡単に関数で表すことが可能な物体と、自然物のようにほとんどが複雑な曲線で構成されていて規則性がまったくなく、関数で表すことが不可能な物体の2種類に大きくわけることができる。人間はたとえ自然物であろうと物体の広がりの方角を自然に認識する。そして知覚される広がりの方角は、ほとんどすべての人間に共通であると考えられる。さらに、この軸にそって物体がどの方向に伸びているのか、どの方向に広がっているのかを認識していると考えられる。また逆に、広がりの方角を認識することができれば、ある程度の物体の構造を推測することが可能になる。このような物体の広がりを示す性質を物体の方向性と呼ぶことにする。

現実存在する物体は、棒のように1つの方向に伸びている物体、板のように2次的に2つの方向に広がっている物体、サイコロのように3次的に3つの方向にほぼ均等に広がっている物体、の3種類に大別することができる。このような性質を物体の次元性と呼ぶことにする。

平面上の周期をもつテクスチャの周期と面の傾きとの関係を利用して平面の傾きや形状を復元することができる[1]。一方、生い茂った樹木や咲き乱れた花は空間に確率的に分布したテクスチャと考えることができる。このように3次元空間に確率的に分布したテクスチャの幾何学的特徴を定義し、それに基づいて3次元物体を認識する試みは始まったばかりである[2]。

人間が以前に獲得したデータだけからある程度の物体の構造を認識し、そのデータと新しく獲得したデータとから更に詳しく物体の構造を認識していることが推測できる。すなわち、『観測地点Aから見える範囲の対象を観測し、次に別の観測地点Bへと移動し、観測地点Bで改めて観測をする…』を数回繰り返して行ない、最終的に物体全体の観測を終了してから物体の構造がどのようなものであるのかを認識している。例えば、樹木を見る場合を考えてみると、対象の樹木を一周りしなければ、本当にその樹木がどのような構造をしているのかを理解できない。また、人間は物体の情報を数値ではなく記号によって表現していることが推測できる。

本論文では、以上のような人間が自然に行っている認識過程に基づいて3次元空間に存在する自然物の認識・理解の数理的性質を解明する手始めとして物体のおおよその構造を理解・認識する計算モデルを提案する。まず、物体のモーメント行列の固有値・固有ベクトルを利用して物体の大局的構造としての物体の方向性と次元性を定義する。これは、グラム行列の条件数によるヒルベルト空間の偏平度の定義[3]を3次元ユークリッド空間の閉領域に適用したものと考えることもできる。

そして、Ojaの主軸解析機(PCA)[4,5]を改良して、物体表面の計測情報から物体の重心、モーメント行列の固有値・固有ベクトルを同時に計算する算法を提案し、物体の次元性と方向性とを計算する機構を構成する。

さらに、数値計算結果の量子化と記号化との関係を明確にし、計算結果を量子化して、物体の大局的構造を記号化する機構を構成する。ただし、以下本論文では適当な方法によって対象物体の表面の3次元空間での位置が計測できるものとして議論を進める。

2. 物体の次元性と方向性

2.1. 表面形状のモーメント

3次元ユークリッド空間 \mathbb{R}^3 の有限閉集合 V を物体と呼ぶことにする。現実には物体を計測する場合には V の表面 ∂V だけしか計測できない。そこで、以下では、 V の近似として ∂V を物体と呼ぶことにする。

物体の重心を g とする。 $v \in \partial V$ に対して、

$$x = v - g \quad (1)$$

とする。重心を原点に移動した物体を ∂V_g で表すことにする。 x は ∂V_g の要素となる。原点を始点とする単位ベクトルを n とする。 n の方向を軸とする物体モーメントは、

$$M(n) = \int_{x \in \partial V_g} \|x - (x, n)n\|^2 dx \quad (2)$$

によって計算できる。ただし、 (\cdot, \cdot) は \mathbb{R}^3 の内積であり、 $\|\cdot\| = \sqrt{(\cdot, \cdot)}$ はノルムである。

ここで、 n の方向を変化させて $M(n)$ を最小にすることを考えると、

$$M(n) = \int_{x \in \partial V_g} \|x\|^2 dx - \int_{x \in \partial V_g} \|(x, n)n\|^2 dx \quad (3)$$

より、

$$m'(n) = \int_{x \in \partial V_g} \|(x, n)\|^2 dx \quad (4)$$

を最大にする単位ベクトルが $M(n)$ を最小にする。このようなベクトルは、半正値対称行列 M :

$$M = \int_{x \in \partial V_g} xx^T dx \quad (5)$$

の固有ベクトルとなる。そこで、 M の3つの固有値に

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0 \quad (6)$$

によって番号を付けることにする。そして対応する固有ベクトルを n_1, n_2, n_3 とする。

2.2. 物体の次元性

本節では、 M の固有値の大小関係によって物体の次元性を判定できることを示す。

図1に1次元的な物体(a)、2次元的な物体(b)、3次元的な物体(c)の概要図を示す。矢印はそれぞれの物

体のモーメント軸の方向を表し、矢印の太さはそれぞれのモーメントの固有値の大きさを表している。

(a) の場合、ある 1 つのベクトル量が、他の 2 つのベクトル量よりも極端に大きくなる。従って一番大きいベクトル量の方向軸にそって延びていると判別できる。またその軸を回転軸とすれば、物体は安定した状態で回転することが可能である。

(b) の場合は、ある 1 つのベクトル量が、他の 2 つのベクトル量よりも極端に小さくなる。従って 2 つの大きいベクトル量の方向軸にそって広がっていると判別できる。また一番小さいベクトル量の方向軸を回転軸とすれば、物体は安定した状態で回転することが可能である。

(c) の場合は、3 つのベクトル量が極端に大きくもなく小さくもない。つまりほぼ同じくらいのベクトル量を持っていると判別できる。すなわち、特定の方向だけに広がっていない。

以上の考察から、

$$\lambda_1 \gg \lambda_2 \cong \lambda_3 \quad (7)$$

であれば物体は 1 次元的であり、

$$\lambda_1 \cong \lambda_2 \gg \lambda_3 \quad (8)$$

であれば物体は 2 次元的である。さらに、

$$\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3 \quad (9)$$

であれば物体は 3 次元的である。実際には固有値の比が意味を持つ。そこで、

$$\tau_1 = \lambda_2/\lambda_1, \tau_2 = \lambda_3/\lambda_1 \quad (10)$$

の大小によって次元性を判定する。すなわち、 $0 \leq \tau_1 \leq 1$ $0 \leq \tau_2 \leq \tau_1$ に対して、閾値 τ を設定し、関数 D :

$$D(V) = \begin{cases} 1, & \text{if } \tau_1 < \tau \wedge \tau_2 < \tau \\ 2, & \text{if } \tau_1 \geq \tau \wedge \tau_2 < \tau \\ 3, & \text{if } \tau_1 \geq \tau \wedge \tau_2 \geq \tau \end{cases} \quad (11)$$

によって物体の次元性を判定する。

2.3. 物体の方向性

次に、 M の固有ベクトルによって、物体の方向性を定義する。

物体が棒状であるとき、物体を 1 つの主軸ベクトルの定数倍によって近似できる:

$$\boldsymbol{x} = \xi_1 \boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{x} \in \partial V \quad (12)$$

また、物体が板状であるとき、物体を 2 つの主軸ベクトルの線形和によって近似できる:

$$\boldsymbol{x} = \xi_1 \boldsymbol{n}_1 + \xi_2 \boldsymbol{n}_2, \boldsymbol{x} \in \partial V \quad (13)$$

しかし、物体が塊であるとき、物体を表現するためには 3 つの主軸ベクトル $\boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{n}_2, \boldsymbol{n}_3$ すべてが必要である:

$$\boldsymbol{x} = \xi_1 \boldsymbol{n}_1 + \xi_2 \boldsymbol{n}_2 + \xi_3 \boldsymbol{n}_3, \boldsymbol{x} \in \partial V \quad (14)$$

従って、1 次元的な物体は、 \boldsymbol{n}_1 の方向に延びており、2 次元的な物体は、 \boldsymbol{n}_3 に垂直な方向に広がっていることがわかる。一方、3 次元的な物体は、 $\boldsymbol{n}_1, \boldsymbol{n}_2, \boldsymbol{n}_3$ を基準軸としてほぼ均等に広がっていることになる。

3. 座標系の変換

本論文では、観測系が物体の回りを 3 次元的に移動して環境を計測する場合を考えている。そこで、計測カメラに固有の座標系を観測座標と呼び、外界の位置を表現するために任意に固定した座標系を世界座標と呼ぶことにする。従って、物体の方向性や相対位置はこの世界座標を基準として表現されることになる。

世界座標のベクトルを直交座標 (x, y, z) で表すことにする。そして、図 2 に示すように、 $\boldsymbol{c} = (-c_1, -c_2, -c_3)^T$ を原点とし、 $-\boldsymbol{c}$ の方向を Z 軸とする座標系を観測座標とする。

$$c = \sqrt{c_1^2 + c_2^2 + c_3^2} \quad (15)$$

$$c' = \sqrt{c_2^2 + c_3^2} \quad (16)$$

$$-\frac{\boldsymbol{c}}{c} = (\cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi \sin \theta)^T \quad (17)$$

と置き、 \boldsymbol{c} を媒介変数 $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ によって表す。また、行列 \boldsymbol{R} を

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} \sin \theta, & 0, & \cos \theta \\ \sin \phi \cos \theta, & \cos \phi, & \sin \phi \sin \theta \\ -\cos \phi \cos \theta, & \sin \phi, & \cos \phi \sin \theta \end{pmatrix} \quad (18)$$

と置けば、観測座標のベクトル \boldsymbol{x}' と世界座標のベクトル \boldsymbol{x} とは

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{x}' + \boldsymbol{c} \quad (19)$$

なる関係で結ばれている。

実際には、世界座標の中での観測座標の原点の位置を決定してから計測を行うことになる。そこで、観測座標から世界座標への変換行列 \boldsymbol{R} を c_1, c_2, c_3 によって表すことにする。式 (17) より、 $c_1 \neq 0$ の場合は、

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{c_1}{c}, & \sin \theta &= \frac{c'}{c} \\ \cos \phi &= \frac{c_2}{c'}, & \sin \phi &= \frac{c_3}{c'} \end{aligned} \quad (20)$$

となり、 $c_1 = 0$ の場合は、

$$\begin{aligned} \cos \theta &= 0, & \sin \theta &= 1 \\ \cos \phi &= \frac{c_2}{c'}, & \sin \phi &= \frac{c_3}{c'} \end{aligned} \quad (21)$$

となる。式 (20), (21) を \boldsymbol{R} に代入すれば、計測座標の原点の位置から回転行列を決定できる。

4. 方向ベクトルの量子化と記号化

人間が外界の方向を決めるときに、『左 45 度、前 45 度の方向』のように数値による表現ではなく、『左斜め前の方向』のような記号化された表現をする。そこで、本章では、単位ベクトルの量子化とその記号化によって方向性の記号化過程を説明する。

まず、 $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^3, \boldsymbol{x} \neq \mathbf{0}$ を

$$\frac{\mathbf{x}}{\|\mathbf{x}\|} = (\cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi \cos \theta)^T \quad (22)$$

と媒介変数表示する。ここで、 $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \phi \leq 2\pi$ である。 θ , ϕ をそれぞれ、

$$q(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta \leq \pi/8 \\ \pi/4, & \pi/8 < \theta < 3\pi/8 \\ \pi/2, & 3\pi/8 \leq \theta \leq 5\pi/8 \\ 3\pi/4, & 5\pi/8 < \theta < 7\pi/8 \\ \pi, & 7\pi/8 \leq \theta \leq \pi \end{cases} \quad (23)$$

$$q(\phi) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \phi \leq \pi/8 \\ \pi/4, & \pi/8 < \phi < 3\pi/8 \\ \pi/2, & 3\pi/8 \leq \phi \leq 5\pi/8 \\ 3\pi/4, & 5\pi/8 < \phi < 7\pi/8 \\ \pi, & 7\pi/8 \leq \phi \leq 9\pi/8 \\ 5\pi/4, & 9\pi/8 < \phi < 11\pi/8 \\ 3\pi/2, & 11\pi/8 \leq \phi \leq 13\pi/8 \\ 7\pi/4, & 13\pi/8 < \phi < 15\pi/8 \\ 0, & 15\pi/8 \leq \phi \leq 2\pi \end{cases} \quad (24)$$

によって量子化する。図3に球面状の分割領域の模式図を示す。このとき、 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ は

$$\begin{array}{lll} (\alpha, -\alpha, \alpha)^T, & (\beta, 0, \beta)^T, & (\alpha, \alpha, \alpha)^T \\ (\beta, -\beta, 0)^T, & (1, 0, 0)^T, & (\beta, \beta, 0)^T \\ (\alpha, -\alpha, -\alpha)^T, & (\beta, 0, -\beta)^T, & (\alpha, \alpha, -\alpha)^T \\ (0, -\beta, \beta)^T, & (0, 0, 1)^T, & (0, \beta, \beta)^T \\ (0, -1, 0)^T, & & (0, 1, 0)^T \\ (0, -\beta, -\beta)^T, & (0, 0, -1)^T, & (0, \beta, -\beta)^T \\ (-\alpha, -\alpha, \alpha)^T, & (-\beta, 0, \beta)^T, & (-\alpha, \alpha, \alpha)^T \\ (-\beta, -\beta, 0)^T, & (-1, 0, 0)^T, & (-\beta, \beta, 0)^T \\ (-\alpha, -\alpha, -\alpha)^T, & (-\beta, 0, -\beta)^T, & (-\alpha, \alpha, -\alpha)^T \end{array} \quad (25)$$

なる26方向の単位ベクトルに量子化される。ただし、 $\alpha = 1/\sqrt{3}$, $\beta = 1/\sqrt{2}$ である。 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ から(25)への交換を q と書くことにする。

量子化された方向は互いに逆の方向からなる13組に分けることができる。しかし、上下方向に向いている同じ物体でも原点より上にある場合は、『上方向に向いている』といい、原点より下にある場合は、『下方向に向いている』というだろう。すなわち、物体が座標系のどこに存在するのかわかることによってベクトルに対応する記号が変わることになる。従って、26方向全ての方向への量子化が必要になる。

x 軸の正方向を上、 y 軸の正方向を右、 z 軸の正方向を前、とし、上下、左右、前後をU,D,L,R,F,Bと記号化する。また、中心をCとする。そして、変換

$$S(\mathbf{x}) = \begin{cases} \text{UFL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\alpha, -\alpha, \alpha)^T \\ \text{UF} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\beta, 0, \beta)^T \\ \text{UFR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\alpha, \alpha, \alpha)^T \\ \text{UL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\beta, -\beta, 0)^T \\ \text{U} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (1, 0, 0)^T \\ \text{UR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\beta, \beta, 0)^T \\ \text{UBL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\alpha, -\alpha, -\alpha)^T \\ \text{UB} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\beta, 0, -\beta)^T \\ \text{UBR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (\alpha, \alpha, -\alpha)^T \\ \text{FL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, -\beta, \beta)^T \\ \text{F} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, 0, 1)^T \\ \text{FR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, \beta, \beta)^T \\ \text{L} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, -1, 0)^T \\ \text{C} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, 0, 0)^T \\ \text{R} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, 1, 0)^T \\ \text{BL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, -\beta, -\beta)^T \\ \text{B} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, 0, -1)^T \\ \text{BR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (0, \beta, -\beta)^T \\ \text{DFL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\alpha, -\alpha, \alpha)^T \\ \text{DF} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\beta, 0, \beta)^T \\ \text{DFR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\alpha, \alpha, \alpha)^T \\ \text{DL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\beta, -\beta, 0)^T \\ \text{D} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-1, 0, 0)^T \\ \text{DR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\beta, \beta, 0)^T \\ \text{DBL} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\alpha, -\alpha, -\alpha)^T \\ \text{DB} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\beta, 0, -\beta)^T \\ \text{DBR} & \text{if } q(\mathbf{x}) = (-\alpha, \alpha, -\alpha)^T \end{cases} \quad (26)$$

に従ってベクトルの方向を記号化する。

5. 次元性と方向性の並列計算

時々刻々と計測される平均を零とする確率ベクトル $\mathbf{x}(i)$ ($i \geq 1$)から、OjaのPCAは、

$$\begin{aligned} n_k(i+1) &= n_k(i) + \gamma(i)y_k(i)\mathbf{x}(i) \\ y_k(i) &= n_k(i)^T \mathbf{x}(i) \\ \mathbf{a}(i) &= \mathbf{x}(i) - \theta_k \sum_{k=1}^3 y_k(i)n_k(i) \end{aligned} \quad (27)$$

によって $\{\mathbf{x}(i)\}_{i \geq 1}$ の主軸を決定する。ここで、 $\gamma(i)$ は i の増加と共に単調減少する関数であり、 θ_k は重みである。OjaのPCAは収束し、 $\{\mathbf{x}(i)\}_{i \geq 1}$ の幾何学的な次元 K に等しい数だけ長さが1の主軸 n_k ($1 \leq k \leq K$)を出力する。

次元性の判定には固有値、すなわち主軸の寄与率が必要である。そこで、固有値 λ_k ($k = 1, 2, 3$)を、固有ベクトルとモーメント行列

$$M(i) = \sum_{j=1}^i \mathbf{x}(j)\mathbf{x}(j)^T \quad (28)$$

とより、

$$\lambda_k(i) = \|M(i)n_k(i)\| \quad (29)$$

によって計算する。

物体の次元性・方向性を解析するためには、計測対象領域の更新と観測点の移動を考慮して Oja の PCA を以下のように拡張する必要がある。

次元性・方向性の計算

- 1: 世界座標系の中で観測者座標系を決定する。
- 2: 観測者座標系でデータを入力する。
- 3: データを世界座標系へ変換する。
- 4: 仮の重心を決定する。
- 5: 観測が終了したデータだけで、Oja のアルゴリズムにより、方向性・次元性を解析する。このときの固有値・固有ベクトルを初期値とする。
- 6: 新しい観測者座標系を決定する。
- 7: データを入力し、世界座標系へ変換する。
- 8: Oja のアルゴリズムにより、次元性・方向性を解析する。
- 9: 8 で、もし、観測者の移動条件に適したならば、4 へ戻る。
適していなければ、7 へ戻る。
- 10: 観測が全て終了したならば、物体全体の次元性・方向性を数値として出力する。
- 11: 10 の出力である重心・方向を量子化し、記号化する。
- 12: 11 の結果を文章として出力する。

移動条件を解析的に示すためにいくつかの用意をする。まず、 $v(i)$ を計測した計測座標の原点を $c(i)$ とする。そして、計測データの重心を

$$g(i) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i v(k) \quad (30)$$

とする。また、行列 A のシュミットノルムを $\|A\|_2$ とする。

5 で得られた固有ベクトル、固有値を n_k ($k=1, 2, 3$)、 λ_k ($k=1, 2, 3$)、8 で得られた固有ベクトル、固有値を n'_k ($k=1, 2, 3$)、 λ'_k ($k=1, 2, 3$) とする。そして、2 つの行列を

$$U = (n_1, n_2, n_3), U' = (n'_1, n'_2, n'_3) \quad (31)$$

と置くことにする。

移動条件として、

1. 観測データの増加による重心の移動。
2. ある方向の観測データの増加。

3. 観測データの増加による主軸の回転。

4. 観測座標の原点の移動。

を採用する。

1, 2 はある方向の観測データが増加した場合への対処である。この場合には、観測データの増加によって重心の移動が起こる。3 は観測データの増加によって主軸の方向が変化した場合への対処である。4 は観測点の移動であり、新たな観測データが増加することに対する対処である。いずれの場合も移動前の主軸の値を初期値として、PCA を再起動させる必要がある。

それぞれ、判定条件を数式で表すと、適当な正の定数 ϵ_1, ϵ_2 に対して

1. $\|g' - g\| > \epsilon_1$
2. $\|U' - U\|_2 > \epsilon_2$
3. $\lambda'_k \gg \lambda_k \vee \lambda'_k \ll \lambda_k$
4. $c(i+1) \neq c(i)$

となる。1 に対処するためには、

$$g(i+1) = \frac{i}{i+1}g(i) + \frac{1}{i+1}v(i+1) \quad (32)$$

によって新しい観測が得られるたびに重心を更新する必要がある。

次元数は、 τ_1, τ_2 を入力とする図 4 の回路によって判定できる。ただし、 τ_1, τ_2 の値が τ に対して大きいか等しければ、論理値 1、小さければ、論理値 0 を割り振っている。また、 $\tau_1 < \tau$ かつ $\tau_2 \geq \tau$ となることはないので、この場合は考える必要がない。

物体の構造は方向だけではなく、物体の次元にも依存する。そこで、次元および、方向と重心の量子化ベクトルの記号によって

- 1 次元的な場合

「物体は、座標系の $S(g)$ に存在して、 $S(n_1)$ の方向に延びている。」

- 2 次元的な場合

「物体は、座標系の $S(g)$ に存在して、 $S(n_3)$ に垂直な方向に広がっている。」

- 3 次元的な場合

「物体は、座標系の $S(g)$ に存在する。」

と物体の構造を表現する。ただし、記号 $S(x)$ の部分は対応する自然な日本語に置き換えることにする。

方向量子化機 VQ、および、次元・方向解析機 DDA の出力から文章を生成する文章生成機 N-to-S を図 5 に示す。文章生成機は、VQ と DDA の出力によって、適当な文章をデータベースから呼び出す回路である。

アルゴリズムによって決まる計算機構の全体の構成を図 6 に示す。

O-to-W は座標変換機, EPCA は主軸とその固有値とを同時に計算する主軸解析機, GA は重心の解析機, RA は主軸回転の解析機, EA は固有値の大きさの解析機, CA は観測原点の解析機, である。

このうち, O-to-W は初期視覚に対応する。DDA, N-to-S は図 4, 図 5 の回路が一体となった回路であり高次視覚対応している。その他の部分は中期視覚に対応していると考えることができる。

6. 計算機実験

5 において提案したアルゴリズムを Pidgin-ALGOL によって記述すると, 次のようになる。

```

procedure 方向性・次元性の解析法
begin
  A, a の入力
  c の決定
  for i ← 1 until a do
    begin
      v の入力
       $v \leftarrow Rv' + c$ 
    end
    while(a < A) do
      begin
         $g \leftarrow \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a v$ 
        方向性・次元性の解析
        (Oja のアルゴリズム)
        新しい c の決定
        repeat
          v の入力
           $v \leftarrow Rv' + c$ 
          方向性・次元性の解析
          (Oja のアルゴリズム)
        until
          (移動をしない  $\wedge a < A$ )
        end
      方向性・次元性の決定
    end
  end

```

ただし, A は総入力数, a は最初に観測できる数をそれぞれ表している。

図 6 の機械の動作を確認するために, 上のアルゴリズムに従って実験を行った。

対象とする物体は図 7(a), (b), (c), (d) の 4 種類の物体である。

その結果の出力は

- (a) 「1 次元的で, 左後ろの方向に延びていて, 右後ろにある。」
- (b) 「2 次元的で, 前方向に垂直な方向に広がっていて, 左前上にある。」
- (c) 「3 次元的で, 上にある。」
- (d) 「1 次元的で, 左の方向に延びていて, 後上にある。」

であった。提案したアルゴリズムによって上の実験から, 物体の次元性と方向性とを認識できることが分かる。

7. むすび

本論文では, 物体のモーメント行列の固有値・固有ベクトルを利用して物体の大局的構造としての物体の次元性と方向性とを定義した。そして, 物体表面の計測情報から物体の次元性と方向性とを計算する機構を構成した。さらに, 量子化と記号化との関係を明確にし, 物体の大局的構造を記号化する機構を構成した。

本論文の計算機実験では, 剛体の表面上の点を確率的に走査して計測した位置情報から, 物体の幾何学情報を計算した。しかし, 計算の基本となる Oja の主軸解析機 [4,5] が元々確率ベクトルを対象としたものであるから, 樹木の枝や, 樹木に生い茂った葉のような空間の一部に確率的に分布した対象 [2] に提案した手法を適用しても, 当然まったく同様に空間確率分布構造の幾何学情報を決定できる。

また, 本論文では, 物体を総ての方向から計測することを仮定したが, 当然, 限られた方向からしか計測しない場合でも提案した手法を適用できる。このとき, 得られた情報が不完全なものであれば, 計測情報から推測される見かけの方向性・次元性, および, 重心が算出されることになる。さらに, 主軸の方向および寄与率は, 物体の整合判定のための基本的な情報である。従って, 提案した機械の数値計算部分を物体の整合判定の前処理部として利用できる。

本研究の一部は文部省からの科学研究費補助金, 實吉奨学会研究助成金, ならびに, 電気通信フロンティア研究開発によるものである。

文献

- [1] D. H. Ballard, and Ch. M. Brown: *Computer Vision*, 1st Edition. Prentice-Hall; New Jersey, 1982.
- [2] A. Waksman and A. Rosenfeld: Sparse, obaque three-dimensional texture 1. Arborescent patterns, *Computer Vision Graphics and Image Processing: Image Understanding*, Vol. 57, pp.388-399, 1993.
- [3] R. Courant and D. Hilbert: *Methoden der Mathematischen Physik*, Springer Verlag; Berlin 1931.
- [4] E. Oja: Principle components, miner components, and linear newral networks, *Neural Networks*, Vol. 5, pp.927-935, 1992.
- [5] E. Oja, H. Ogawa, and J. Wangviwatta: Principal component analysis by homogeneous newral networks, Part 1; The weighted subspace criterion, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol. E75-D, pp.366-375, 1992.

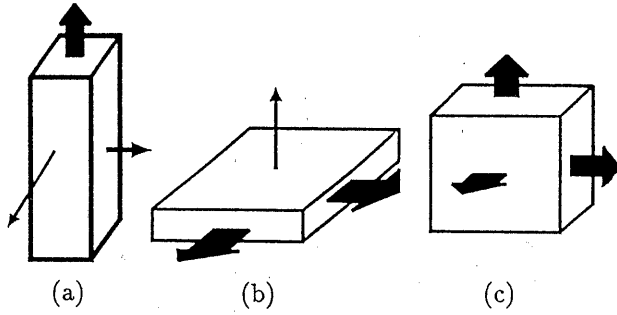


図 1

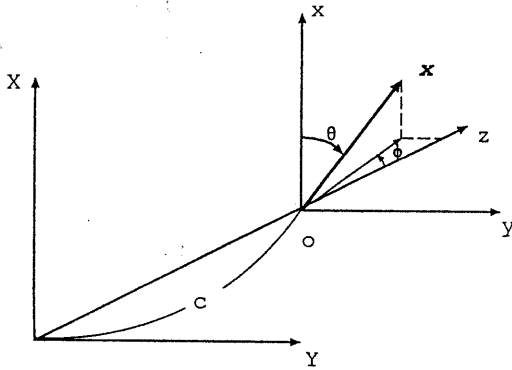


図 2

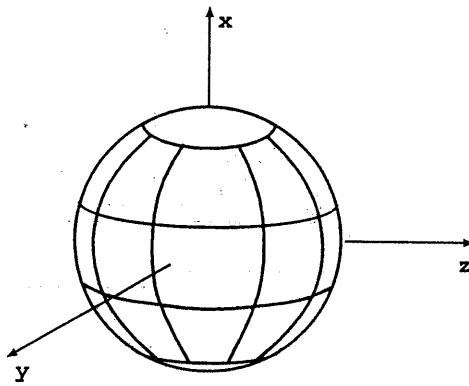


図 3

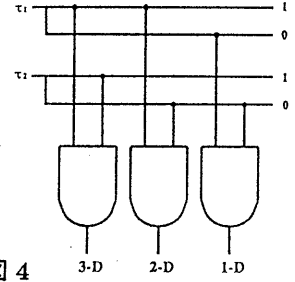


図 4

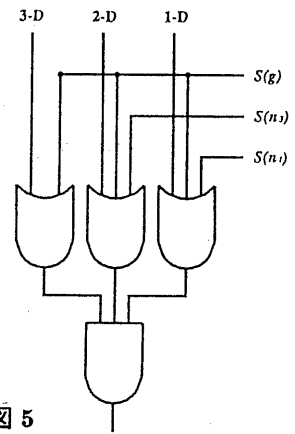


図 5

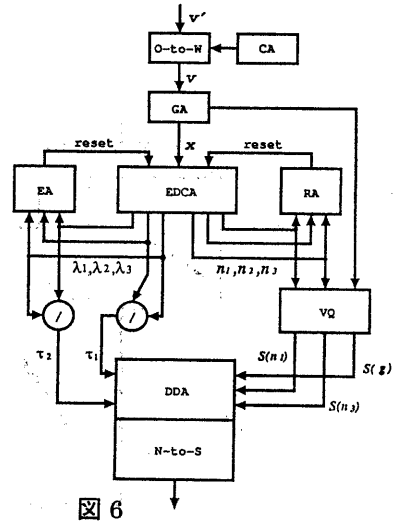


図 6

図 1 (a)1 次元のな物体, (b)2 次元のな物体, (c)3 次元のな物体. 矢印はそれぞれの物体のモーメント軸の方向を表し, 矢印の太さはそれぞれのモーメントの固有値の大きさを表している.

図 2 世界座標を (x, y, z) とする. 世界座標の c を原点とし, $-c$ の方向を Z 軸とする座標系を観測座標とする.

図 3 物体が存在する位置を記号化するためには 26 方向全ての方向への量子化が必要になる.

図 4 固有値の比から次元数を判定する回路. τ_1, τ_2 の値が τ に対して大きいか等しければ論理値 1 を, そして, 小さければ論理値 0 を割り振る.

図 5 方向量子化機 VQ, および, 次元・方向解析機 DDA の出力から文章を生成する.

図 6 O-to-W:座標変換機 CA:観測原点解析機, EPCA:拡張主軸解析機, GA:重心解析機, RA:主軸回転解析機, EA:固有値解析機, DDA:方向性・次元性解析機である.

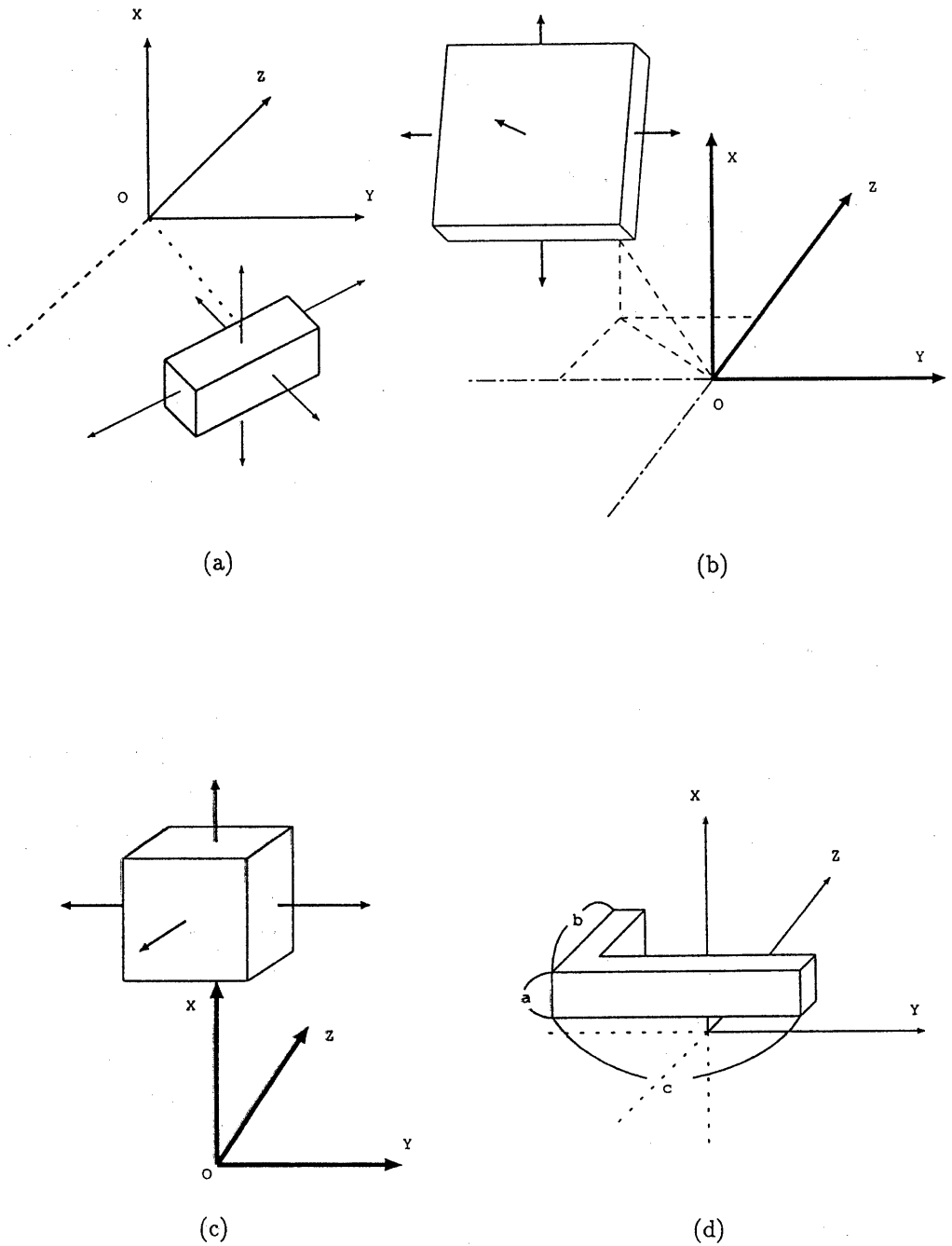


図 7

図 7 計算結果は、それぞれ、(a)「1 次元的で、左後ろの方向に延びていて、右後ろにある。」、(b)「2 次元的で、前方向に垂直な方向に広がっていて、左前上にある。」、(c)「3 次元的で、上にある。」、(d)「1 次元的で、左の方向に延びていて、後上にある。」である。ただし、世界座標 (x, y, z) において x 軸の正方向を上、 y 軸の正方向を右、 z 軸の正方向を前、としている。