距離画像からの物体の3次元形状記述の抽出 ——回転体の場合——

正会員 横 矢 直 和[†],マーチン D. レビン^{††}

Recovery of Volumetric Descriptions of Objects from a Range Image : The Case for Solids of Revolution

Naokazu Yokoya[†] and Martin D. Levine^{††}

Abstract Many man-made objects such as industrial parts are partially constructed of *surfaces of revolution*, as well as planar surfaces. This paper studies the problem of finding surfaces of revolution in range data and proposes an approach based on the fact that at least one of two *focal surfaces* for a surface of revolution degenerates into the axis of rotation. For each point in the range image the centers of principal curvature, which construct the focal surface, are obtained from the first and second partial derivatives of the image and Hough transform is used to detect the axes of rotation by finding the centers which lie on straight lines in space. Finally, the revolution solid is volumetrically determined by estimating the radius function of cross section along each axis. The proposed method can be used where occlusion or truncation is a problem because it does not require the entire surfaces to be visible. The experiments have been successfully carried out using real range data.

1. ま え が き

コンピュータビジョンにおいては、入力画像から対象となるシーンの記述をいかに抽出するかが重要な課題である。ところで、通常の処理対象である工業部品等の人工物体は加工過程の制約から平面と回転面の部分曲面で構成されていることが多い。このような場合には、物体は多面体と回転体を要素形状とする構成的立体幾何モデル(CSG)¹⁾で表現できる。このアプローチでは画像からの要素形状の抽出が課題であり、比較

的古くから多面体の解析が試みられてきた。本論文では、能動的レンジファインダ等²⁾を用いて単一の観測方向から得られた距離画像(各画素が、ある基準面から物体の可視表面までの距離を値に持つような画像。以下では、単に距離画像と呼ぶ)から回転体の3次元形状記述を抽出する方法について述べる。

画像から物体の3次元形状記述(体積表現)を抽出する方法には、通常の濃淡画像を用いる方法と距離画像を用いる方法とがある。本論文に関連する研究としては、これまでに、Marr³⁾が濃淡画像から得られる輪

キーワード：コンピュータビジョン、距離画像解析、3次元形状記述、物体認識、一般化円筒、回転体

1988年6月17日、電子情報通信学会パターン認識・理解研究会で発表

1991年2月8日受付、1991年4月23日再受付

[†] 電子技術総合研究所 知能情報部画像研究室(〒305 つくば市梅園 1-1-4, TEL 0298-58-5944)

^{††} マッギル大学 マッギル知能機械研究センター(カナダ、ケベック州モントリオール市大学通 3480, TEL 514-398-7115)

[†] Image Understanding Section, Machine Understanding Division, Electrotechnical Laboratory (1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305, Japan)

^{††} McGill Research Centre for Intelligent Machines, McGill University (3480, University Street, Montreal, Québec, Canada H3A 2A7)

郭線の情報から一般化円筒⁴⁾の画像上での軸を検出する方法について議論している。また、Shafer & Kanade⁵⁾は一般化円筒の数学的特徴を調べる過程で、そのサブクラスである回転体の性質を調べた。これをもとに Walker & Kanade⁶⁾は、物体表面上の規則的なパターンの見かけ上の歪みから Shape-from-texture 法によって法線分布図を求め、法線ベクトルの延長が回転軸と交差することを利用して回転体を決定する手法を提案した。また、距離画像を用いる方法では、従来、円筒面、円錐面など、数学的な表現が容易な特定の曲面についていくつかの手法が報告され⁷⁻⁹⁾、最近では、隠蔽輪郭線の情報から回転体の3次元形状を復元する試み¹⁰⁾もある。しかし、これら従来の方法は、(1)視野的に物体がただ1つ存在する、(2)物体の隠蔽輪郭線が観測可能である、(3)物体相互のオクルージョンはない、(4)特定の形状を仮定する、等の強い制約があり、非常に限られた状況でしか有効に働かない。

本論文では、隠蔽輪郭線の情報は使わず、回転面に対する2つの中心曲面のうち少なくとも1つは回転軸に退化するという性質を利用した回転面抽出法を提案する。本方法は、まず、距離画像内の各点について計算した主曲率中心の直線クラスタを Hough 変換によって求め、回転軸を決定する。そして次に、軸に沿った断面変化から回転体を決定する。したがって、特定の関数で表される曲面に限らず一般的な回転面を扱えるとともに、複数の物体が存在し、部分的に隠されている場合にも有効である。

以下、2章では、まず準備として、“中心曲面が回転軸に退化する”という回転面の微分幾何学的性質について簡単に述べる。3章では、Hough変換を用いた主曲率中心のクラスタリングによる回転面の抽出法と回転体の決定法について述べ、最後に4章で、実際の距離画像についての実験によって提案手法の有効性を示す。

2. 回転面の微分幾何学的性質

2.1 主曲率中心と中心曲面

3次元曲面 S 上の点 s における2つの主曲率(符号つきの値が大きい方を最大主曲率、小さい方を最小主曲率と呼ぶ)を k_1, k_2 で表し、その逆数である主曲率半径を r_1, r_2 で表す。

$$r_1 = \frac{1}{k_1}, \quad r_2 = \frac{1}{k_2} \quad (1)$$

このとき、点 s に対する2つの主曲率中心の位置 f_1, f_2 は、次式で与えられる(図1参照)。

$$f_i = s + r_i n; i=1, 2 \quad (2)$$

図1 曲面の主曲率中心
Centers of principal curvature for a surface.

図2 z軸を回転軸にもつ回転面
A surface of revolution obtained by revolving a curve in the xz plane about the z axis.

ただし、 n は点 s における単位法線ベクトルである。点 s が曲面 S 上を動いたときに主曲率中心 f_1, f_2 はそれぞれ1つの曲面を定め、これは中心曲面と呼ばれる。

2.2 回転面に対する中心曲面の性質

回転面は平面曲線のある空間直線の回りに回転させることによって得られる。そのときの曲線を母線、軸となる直線を回転軸という。図2のような z 軸を回転軸とする回転体を考えると、回転面 S は次の媒介変数表現で与えられる¹¹⁾。

$$S = \{s = (x, y, z); x = f(u)\cos v, y = f(u)\sin v, z = g(u), a < u < b, f(u) > 0, 0 < v < 2\pi\} \quad (3)$$

曲面 S 上の点 s における単位法線ベクトルは

$$n = \frac{1}{\sqrt{f'(u)^2 + g'(u)^2}} (-g'(u)\cos v, -g'(u)\sin v, f'(u)) \quad (4)$$

となり、2つの主曲率はそれぞれ

$$k_1 = \frac{f'(u)g''(u) - f''(u)g'(u)}{\{f'(u)^2 + g'(u)^2\}^{3/2}} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{g'(u)}{f(u)\{f'(u)^2 + g'(u)^2\}^{1/2}} \quad (6)$$

与えられる。(3)～(6)式を(2)式に代入することによって、主曲率中心に関して次式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_1 = & (f(u)\cos v, f(u)\sin v, g(u)) \\ & + \frac{f'(u)^2 + g'(u)^2}{f'(u)g''(u) - f''(u)g'(u)} (-g'(u)\cos v, \\ & -g'(u)\sin v, f'(u)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_2 = & (f(u)\cos v, f(u)\sin v, g(u)) + \frac{f(u)}{g'(u)} (-g'(u) \\ & \cos v, -g'(u)\sin v, f'(u)) \\ = & \frac{1}{g'(u)} (0, 0, f(u)f'(u) + g(u)g'(u)) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式から、主曲率中心 $\mathbf{f}_2$ が z 軸(回転軸)上にあることは明らかである。すなわち、2つの中心曲面のうち少なくとも1つは必ず回転軸に退化する。なお、 S が球面のときに限り、2つの中心曲面が1点(球の中心)に退化する。

以上のことから、直線上または1点に退化する中心曲面(主曲率中心の集合)を検出することによって、逆に回転軸を決定できることがわかる。主曲率中心は曲面上の各点について定まる局所的な特徴である。したがって、実際の物体を特定の方向から観測して一部分が隠されている場合や回転面の一部が切断されて存在しないような場合にも、回転面のこの性質を軸の決定に利用できる。

3. 距離画像からの回転体の抽出

回転体は回転軸と母線によって一意に定まる。以下では、回転面の中心曲面が回転軸に退化することを利用して距離画像から回転面を抽出し、体積表現としての回転体を定める具体的方法について述べる。提案手法は基本的に次の3つのステップから成っている。

- (1) 主曲率中心の計算：距離画像の各画素について主曲率の中心を計算し、3次元空間にプロットする。
- (2) 回転軸の決定：3次元空間で直線上(または1点)に乗っている主曲率中心の集合を検出することによって回転軸(または球の中心)を決定する。
- (3) 回転体の決定：検出された軸に対応した回転面を抽出し、軸に沿った断面半径の変化を求めることによって母線を決定し、回転体の3次元形状記述を得る。

3.1 主曲率中心の計算

曲面上の各点における主曲率中心は(2)式で与えら

れており、これを距離画像から計算するためには、各点で法線ベクトルと主曲率半径(すなわち主曲率)を算出しなければならない。

(1) グラフ曲面の主曲率中心

本論文では、先に述べたように単一の観察方向から得られた距離画像を対象としているので、次のような媒介変数表現で表されるグラフ曲面について考える。

$$S = \{ \mathbf{s} = (x, y, z); x = u, y = v, z = h(u, v), (u, v) \in D \subseteq R^2 \} \quad (9)$$

すなわち、画像内の点 (x, y) における距離値 z が x, y の一価関数 $h(x, y)$ で与えられる。

このとき、単位法線ベクトルは

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \left(-\frac{\partial h}{\partial x}, -\frac{\partial h}{\partial y}, 1 \right) \quad (10)$$

である。また、主曲率は、第1、第2基本微分形式から決まる(具体的な式については文献12)参照)。したがって、主曲率中心の計算には、距離画像 $z = h(x, y)$ の画像座標 x, y に関する1次および2次の偏微分が必要である。

(2) 距離画像の数値微分

上での議論は曲面を表す関数 $h(x, y)$ が滑らかで微分可能なことが前提になっているが、現実の物体表面は区分的にしか滑らかでなく、通常の一様な微分オペレータでは距離あるいは方向の不連続点(エッジ)の近傍で微分値を正しく計算できない。そこで、エッジ周辺でも正しく微分値を計算するために、次の3つのステップからなる選択的局所曲面当てはめに基づく微分オペレータ¹³⁾を用いる。

- (1) 各点を中心とする窓に対して、双2次多項式を用いた最小自乗近似による局所曲面当てはめを行う(多項式の係数の決定と当てはめ誤差の計算)。
- (2) 各点について、それを被う窓の中からエッジに重ならない窓(最適窓)を選ぶ。具体的には、(1)での曲面当てはめ誤差が最小のものを選ぶ。
- (3) 最適窓に対して(1)で求まっている双2次多項式の係数から、各点での画像座標 x, y に関する1次、2次偏微分を解析的に求める。

この選択的局所曲面当てはめに基づく数値微分によって、距離画像の各画素で主曲率中心を推定する。

3.2 回転軸の決定

先に2.2節で述べたことから、距離画像内に回転面が存在する場合には、3次元空間にプロットされた主曲率中心の分布から直線上に乗っている点群を検出することによって回転軸を決定できる。また、特殊な場合として、1点に集中した主曲率中心の位置から球の

図 3 空間直線上に分布する点の平面への投影
Projection of points on a straight line in space onto 2D planes.

中心が求まる．主曲率中心の分布に対して Hough 変換¹⁴⁾¹⁵⁾を施すことによって空間直線としての回転軸を検出することが考えられるが，単純な方法では 4 次元パラメータ空間でのクラスタリングを要し，計算時間，メモリー量とも膨大になる．

ところで，空間直線を直交する 2 つの平面に投影すると，一般には両平面で直線になり (図 3 参照)，特殊な場合として，平面に垂直な直線が点になる．また，投影像である 2 つの平面直線から逆に空間直線が一意に定まる．そこで，本論文では，主曲率中心を互いに直交する平面に投影することによって，空間直線検出問題を複数の平面直線検出問題に分解し，主曲率中心の投影像に対して 2 次元 Hough 変換を適用する．図 4 に，回転面の軸と球の中心を求めるための多段階 Hough 変換の流れを示す．本手法は基本的に点クラスタ検出と直線クラスタ検出の 2 つのモジュールから成っている．

(1) 主曲率中心分布からの点クラスタの検出

3 次元空間内の主曲率中心を (x, y) 平面および (y, z) 平面に投影する．ただし，投影に際しては点の重複度を平面上で加算する．次に，この主曲率中心分布画像から極大点を検出することによって点クラスタの中心を求める．実際には，まず最初に (x, y) 平面で点クラスタを検出する．次に，そのクラスタに属する主曲率中心のみを (y, z) 平面に投影して主曲率中心分布画像を作成し， (y, z) 平面で点クラスタを探す．両平面で点クラスタが検出された場合に球が存在する．両平面で検出された点クラスタの中心位置をそれぞれ， (x_1, y_1) , (y_2, z_2) とすると，球の中心の推定位置は $(x_1, (y_1 + y_2)/2, z_2)$ である．球の半径は，検出された点クラスタに対応した主曲率中心の主曲率半径の平均値とする．図 4 では，この処理部分を 2 重線で囲んで

図 4 回転軸と球の中心を検出するための主曲率中心の多段階クラスタリング

The multi-stage clustering scheme for finding the rotation axes and the centers of spheres.

示してある．

なお，クラスタリングの各段階で，検出されたクラスタの効果を主曲率中心分布像から削除する．以下で述べる直線クラスタの検出においても，パラメータ空間での度数分布像に対して同様の処理を行う．

(2) 主曲率中心分布からの直線クラスタの検出

平面上に投影された主曲率中心分布から直線クラスタを検出するために通常の Hough 変換¹⁴⁾を利用する．まず， (x, y) 平面での主曲率中心を，

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (11)$$

で (ρ, θ) 空間に写像し，このパラメータ空間で極大点を探すことによって直線を検出する．極大点探索は先の点クラスタ検出と同じ処理である． (ρ, θ) 空間で検出された極大点を (ρ_{xy}, θ_{xy}) とする．次に，この直線クラスタに対応した主曲率中心を (y, z) 平面に投影する．この (y, z) 平面での主曲率中心を (11) 式と同様の式で (ρ, θ) 空間に写像し，直線クラスタを検出する．このときに検出された (ρ, θ) 空間での極大点を (ρ_{yz}, θ_{yz}) で表す．

(x, y) , (y, z) の両平面で対応した直線クラスタが検出された場合， $\theta_{xy} \neq \pi/2$ であれば，回転軸を表す空間直線は (ρ_{xy}, θ_{xy}) と (ρ_{yz}, θ_{yz}) から次式で決まる．

$$\begin{cases} \rho_{xy} = x \cos \theta_{xy} + y \sin \theta_{xy} \\ \rho_{yz} = y \cos \theta_{yz} + z \sin \theta_{yz} \end{cases} \quad (12)$$

$\theta_{xy}=\pi/2$ (かつ $\theta_{yz}=0$) の場合には空間直線が一意に決まらないので、 (z, x) 平面に直線クラスが存在しているか否かを調べなければならない。図4では、この回転軸決定の部分を2重線で囲んで示してある。以上述べた回転軸抽出の基本処理モジュールは既存のソフトウェア¹⁶⁾で実現できる(Hough変換については、SPIDER-IIのEGHGHルーチン)。

Hough変換のためのパラメータ空間のデジタル化において各軸の分割数を等しく m とすると、空間直線を決定するために4次元パラメータ空間で直接Hough変換を行う場合には m^4 個の標本点を記憶する必要があるのに対して、本論文で提案した多段階の2次元Hough変換では高々 $3m^2$ 個の標本点しか記憶する必要がない。したがって、十分に大きな m に対してはメモリー量を大幅に節約できる。また、記憶すべき標本点数の少なさは、パラメータ空間での極大値探索のため計算時間の減少をも意味することは明らかである。

3.3 回転体の決定

回転体の完全な3次元記述は回転軸と母線の決定によって与えられる。前節で述べた方法によって回転軸が決まるので、回転軸に退化する主曲率中心をもつ距離画像内の画素を求めることによって回転面を抽出することができる。回転体の母線を決定するためには、検出された軸に沿って、それに対応した回転面上の点と軸との距離(緯度線の半径)の変化を調べればよい(図5参照)。

点 (x, y, z) から(12)式で表される回転軸に下ろした垂線の足の座標 (x_0, y_0, z_0) は

$$x_0 = \frac{\rho_{xy}}{\cos \theta_{xy}} + ut, y_0 = vt, z_0 = \frac{\rho_{yz}}{\sin \theta_{yz}} + wt \quad (13)$$

と表される。ただし、

$$u = -\tan \theta_{xy}, v = 1, w = -\cot \theta_{yz}, \quad (14)$$

$$t = \frac{u\left(x - \frac{\rho_{xy}}{\cos \theta_{xy}}\right) + vy + w\left(z - \frac{\rho_{yz}}{\sin \theta_{yz}}\right)}{u^2 + v^2 + w^2} \quad (15)$$

である。したがって、点 (x, y, z) を通る回転体の緯

度線の半径 d は

$$d = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (16)$$

で与えられる。検出された回転面上の各点について(16)式で緯度線の半径を推定し、軸上の各点 (x_0, y_0, z_0) で平均化することによって母線を決定する。以上の処理により、距離画像内に見えている回転面の部分曲面から回転体の完全な3次元形状記述を得る。

4. 実験結果

実際の距離画像を用いた実験結果を紹介する。写真1は近似的に回転体と見なせる2つの物体がテーブル上に置かれた実シーンから得た距離画像についての実験結果である。(b)は原画像(a)から生成した陰影画像である。主曲率中心の $(x, y), (z, y)$ 平面への投影像を(c)~(f)に示している。(g)は最小主曲率および最大主曲率の中心の (x, y) 平面への投影像に対してHough変換を施した場合のパラメータ空間 (ρ, θ) の度数分布を表している。回転軸として検出された空間直線を(e), (f)の最小主曲率中心の分布像に重ねて表示し、2つの平面での対応を番号(および色)で示している。(h)は検出された2つの軸に対応した回転面を抽出したものであり、領域内の番号(および色)が(e), (f)での回転軸との対応を示している。実験的にも距離画像から回転軸を正しく検出でき、回転面が抽出可能なことがわかる。

写真2は、多数の物体が重なり合って置かれた複雑なシーンを観測した距離画像についての実験例である。ここではHough平面で最も目立った4つの回転軸を検出し、それらに対応した回転面を抽出しているが、これら以外にも小さな回転面がいくつか存在していることが主曲率中心分布像からわかる。写真3は、写真2で抽出された最も目立った回転面(写真2(h)の曲面1(赤の領域))について3.3節の方法で得た体積表現を2倍に拡大して平行投影で陰影描画したものである。ほぼ正しく回転体の3次元形状記述が得られていることが理解されよう。この例での計算時間は、主曲率中心の計算までに約6分、それ以後の3次元形状記述を得るまでに約10分である(距離画像の大きさは 256×256 , 使用計算機はSun 3/260)。

なお、ここで示した実験例で用いた距離画像はいずれもカナダNRCにおいて開発されたスポット光投影と三角測量原理に基づくレーザレンジファインダ¹⁷⁾を用いて取得した距離画像のデータファイル¹⁸⁾から採ったものである。

図5 回転体の緯度線の半径変化
Radii of the parallels along the axis of rotation.

(a) 距離画像(MECA11)

(b) 距離画像の陰影表示

(c) 最大主曲率中心の xy 平面への投影

(d) 最大主曲率中心の zy 平面への投影

(e) 最小主曲率中心の xy 平面への投影(検出された回転軸を重ねて表示)

(f) 最小主曲率中心の zy 平面への投影(検出された回転軸を重ねて表示)

(g) xy 平面に対する Hough 変換

(h) 抽出された回転面領域

写真 1 2つの回転体を含む実シーンについての実験例

Experimental results for a real range image containing two solids of revolution.

(a) Range image(MECA 11), (b) Shaded image of range data, (c) Centers of maximum principal curvature in the xy plane, (d) Centers of maximum principal curvature in the zy plane, (e) Centers of minimum principal curvature and detected axes in the xy plane, (f) Centers of minimum principal curvature and detected axes in the zy plane, (g) Hough transform for the xy plane, (h) Extracted surfaces of revolution.

(a) 距離画像(MAECA 17)

(b) 距離画像の陰影表示

(c) 最大主曲率中心の xy 平面への投影

(d) 最大主曲率中心の zy 平面への投影

(e) 最小主曲率中心の xy 平面への投影(検出された回転軸を重ねて表示)

(f) 最小主曲率中心の zy 平面への投影(検出された回転軸を重ねて表示)

(g) xy 平面に対する Hough 変換

(h) 抽出された回転面領域

写真 2 多数の物体が重なり合った複雑なシーンについての実験例

Experimental results for a real range image which contains several overlapping objects.

(a) Range Image (MECA17), (b) Shaded image of range data, (c) Centers of maximum principal curvature in the xy plane, (d) Centers of maximum principal curvature in the zy plane, (e) Centers of minimum principal curvature and detected axes in the xy plane, (f) Centers of minimum principal curvature and detected axes in the zy plane, (g) Hough transform for the xy plane, (h) Extracted surfaces of revolution.

写真 3 写真 2 で抽出された曲面 1 の体積表現の陰影描画

Rendering of a volumetric description obtained for the surface 1 in Photograph 2.

5. む す び

本論文では、回転面に対する中心曲面が回転軸に退化するという性質を利用して、多段階 Hough 変換を用いた主曲率中心のクラスタリングによって距離画像から回転面を抽出し、回転体の 3 次元記述を得る方法を実現した。また、提案手法について実際の距離画像を用いた実験を行い、その有効性を確認した。

本手法の特長をまとめると次の通りである。

- (1) 対象物体について特定の形状(円筒、円錐等)を仮定することなく、距離画像から一般的な回転面を抽出し、3次元形状記述を得ることができる。
- (2) 局所的な表面特徴の大局的な集計に基づいているため、複数の物体が存在し、回転面が部分的に隠されたり切断されている場合にも適用可能な強固な手法である。また、物体の隠蔽輪郭に関する先験的な知識や仮定を利用していないため、隠蔽輪郭が観測不能であってもよいという利点がある。

今後は、形状モデルの自動構築を向けて、本手法と多面体抽出を組合せることによって距離画像から物体の CSG 記述を抽出することが課題である。また、そのような体積表現モデルに基づく物体認識システムの開発も考えている。

有益な御討論を頂いた電総研画像研究室およびマッギル知能機械研究センターの皆様へ感謝致します。また、距離画像データを御提供頂いたカナダ NRC 情報技術研究所自律システム研究室の関係諸氏に感謝致します。

〔参 考 文 献〕

- 1) A. A. G. Requicha: "Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems", ACM Computing Surveys, **12**, 4, pp. 437-464 (Dec. 1980)
- 2) 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂(1990)
- 3) D. Marr: "Analysis of Occluding Contour", Proc. Royal Society of London, **B197**, pp. 441-475 (1977)
- 4) T. O. Binford: "Visual Perception by Computer", Proc. IEEE Conf. on Systems and Control (Dec. 1971)
- 5) S. A. Shafer and T. Kanade: "The Theory of Straight Homogeneous Generalized Cylinders", Proc. DARPA Image Understanding Workshop, pp. 210-218 (June 1983)
- 6) E. L. Walker and T. Kanade: "Shape Recovery of a Solid of Revolution from Apparent Distortions of Patterns", CMU-CS-84-152, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, PA (Sep. 1984)
- 7) T. Lozano-Perez, W. E. L. Grimson and S. J. White: "Finding Cylinders in Range Data", Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 202-207 (Apr. 1987)
- 8) 藤田, 佐藤, 井口: "局所曲面形状解析に基づくピンピッキングのためのビジョンシステム", 信学論(D-II), **J73-D-II**, 1, pp. 46-53 (Jan. 1990)
- 9) W-C. Lin and T-W. Chen: "CSG-based Object Recognition Using Range Images", Proc. 9th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR), pp. 99-103 (Nov. 1988)
- 10) P. K. Allen and P. Michelman: "Acquisition and Interpretation of 3-D Sensor Data from Touch", IEEE Trans. Robotics and Automation, **6**, 4, pp. 397-404 (Aug. 1990)
- 11) 小林昭七: 曲線と曲面の微分幾何, 裳華房(1977)
- 12) 横矢, レビン: "距離画像から回転面を抽出するための一手法", 信学技報, **88**, 78, PRU88-27, pp. 49-56 (June 1988)
- 13) 横矢, レビン: "微分幾何学特徴に基づく距離画像分割のためのハイブリッド手法", 情報学論, **30**, 8, pp. 944-953 (Aug. 1989)
- 14) R. O. Duda and P. E. Hart: "Use of Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures", Commun. ACM, **15**, 1, pp. 11-15 (Jan. 1972)
- 15) 松山, 興水: "Hough 変換とパターンマッチング", 情報処理, **30**, 9, pp. 1035-1046 (Sep. 1989)
- 16) 画像処理用サブルーチンパッケージ SPIDER-II 利用者マニュアル(導入解説書), 協同システム開発(1986)
- 17) M. Rioux: "Laser Range Finder Based on Synchronized Scanners", Applied Optics, **23**, 21, pp. 3837-3844 (Nov. 1984)
- 18) M. Rioux and L. Cournoyer: "The NRCC Three-dimensional Image Data Files", Tech. Report, CNRC 29077, National Research Council Canada, Ottawa, Canada (June 1988)

よこやま なおかず
横矢 直和 昭和 54 年, 大阪大学基礎工学部情報工科大学院博士課程修了。同年, 電子技術総合研究所入所。現在, 同所知能情報部画像研究室主任研究官。画像処理ソフトウェア, コンピュータビジョンの研究に従事。工学博士。正会員。

マーチン D. レビン 1963 年, マッギル大学工学部電気工科大学院修士課程修了。1965 年, ロンドン大学インペリアル・カレッジより Ph. D. 取得。現在, マッギル大学工学部電気工学科教授。マッギル知能機械研究センター所長を兼務。コンピュータビジョン, ロボティクスの研究に従事。