

## 面曲率を用いた顔の同定

田中弘美 岸野文郎

ATR 通信システム研究所

ガウス曲率、平均曲率、主曲率等の曲面の曲率は、観察方向に不変な曲面本来の局所形状を表す微分幾何学量で、3次元曲面の解析に重要な役割を果たす。本稿では、顔の距離画像を入力とし、顔の識別問題を「3次元自由曲面の同定問題」と設定し、曲率を用いて顔表面形状を特徴づけ、識別する手法を試みる。37個の実顔距離画像を用いた顔識別実験結果を示し、顔のように類似した曲面の同定に対する、3次元局所形状特徴の有効性と安定性を評価した。

## Surface Curvatures for Face Identification

Hiromi T. Tanaka, Fumio Kishino

ATR Communication Systems Research Laboratories  
Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan

Surface curvatures such as Gaussian, mean and principal curvatures are intrinsic surface properties and have played important roles in curved surface analysis. In this paper, we treat a face identification problem as a 3D shape identification problem of free-form curved surfaces and present an approach based on the analysis of two principal curvatures. The approach is based on a simple two-dimensional histogram matching(intersection) method which does not require surface segmentation. The method is tested for its simplicity and robustness and successfully implemented for each of 37 face range images from NRCC(National Research Council Canada) 3D image data files. Results shows that shape information from surface curvatures provide vital cues in distinguishing and identifying fine surface structure as human faces.

## 1 まえがき

人間の持つ顔知覚・認識能力は、人や社会と円滑なコミュニケーションを持つ上で極めて重要な役割を果たしている。計算機による顔の自動識別の研究は従来は犯罪の防止や犯人の識別等を目的とされ過去20年に渡り続けられて来た[1]。近年は、高度に情報化された社会背景の下に、「人間主体のマンマシンインターフェースシステム」や「高度なセキュリティシステム」の実現を目指す上で、顔の識別・認識に関する研究は、増々その重要性を増している。

計算機による顔画像の自動識別の研究は、横顔や正面顔の濃淡画像から、輪郭線（シルエット）・目・口・鼻・顎等の主要な造作を特徴点として抽出し、それらのパターンや相互位置関係に基づいて識別する手法が提案されている[2-4]。一般に、これらの特徴点に基づく顔識別方法の問題点は、濃淡顔画像から安定に特徴点を抽出することが非常に困難なことに加え、顔の傾き変化や眼鏡や口ひげなどの付随要素に影響を受けやすいことがあげられる。一方、顔表面の3次元形状を反映した濃度分布に着目した手法[5]、ニューラルネットワークを用いた表情年齢の変化にも対処できる手法[6]も提案されている。

近年、3次元（距離）情報入力技術の進展に伴い、顔の3次元形状を直接計測した距離画像や、更に形状と輝度を同時に計測した画像の解析も盛んになってきた[7,8]。特に、レンジファインダから得られる高精度の密な距離画像は、微分幾何学に基づいた曲面の解析にも有効である。そこで本稿では、顔の距離画像を入力とし、顔の識別問題を、3次元自由曲面の同定問題と設定し、観察方向に不変な微分幾何学特徴を用いて表面形状を特徴づけ、識別する手法を試みる。顔曲面のように類似した曲面の同定に対する、3次元局所形状特徴の有効性と安定性を定性的に評価することを目的としている。

3次元曲面の解析には、ガウス曲率、平均曲率、主曲率が用いられる。これらは、観察方向に不変な微分幾何学特徴量で、曲面本来の局所形状を2次まで近似することができる。しかし距離画像から曲率を抽出する計算は、入力誤差に影響を受け易く、表面の（距離）不連続領域では結果の精度が安定しないという問題点がある。そのため、計算された曲率の符合のみに

信頼性がおかれ、その絶対値の有効性は確認されていない。曲率の符号を用いた表面点の分類法・領域分割法、更に領域分割の比較的容易な曲面を対象にした認識法が提案された[9-11]。

曲率を顔曲面の認識に用いた報告としては、顔の曲率分布の対称性からガウス曲率と平均曲率の符号から顔対称面（横顔輪郭）を抽出する手法[12]、拡張ガウス球に写像した鼻・顎・頬に分割された凸領域とそれらの相対位置関係を用いた手法[13]がある。しかし、曲率（の符号）による領域分割を前題とするアプローチは、2次元曲面が滑らかにつながっているような場合には、領域分割自体が困難であるという問題がある。

本稿では、主曲率ヒストグラムの相関を用いた顔識別法を提案する。本手法の特長としては、1) 領域分割を行わない、2) 曲率の絶対値に基づく自由曲面の同定法である、3) アルゴリズムが簡単である、4) 顔曲面の特徴を曲率空間から定性的に抽出する、4) 顔曲面のような複雑で微妙な自由曲面の同定に対する局所形状情報の有効性を示した点にある。本手法は、以下の2ステップにより顔識別を行なう。まず、顔距離画像（の等距離線）の各点について、最大・最小曲率 $\kappa_1, \kappa_2$ を計算し、その値を、最大・最小曲率を二軸とする2次元特徴空間に写像し、曲率ヒストグラムを生成する。曲率の極値を含む曲率の大きい部分のヒストグラムを各顔の表現とし、顔モデルライブラリを生成する。次に照合する顔のヒストグラムとモデル顔のヒストグラムの相関度を用いて顔の同定および確認を行なう。本アプローチの背景としては、1) 筆者らが開発した等距離線を用いた可変窓式曲率抽出法[17]により安定した精度の曲率が得られたこと、2) 自由曲面の同定、認識には曲率極値点もしくは曲率の大きな領域が有効であること[16]、3) 曲率極値点を含む凹凸の大きな領域が、鼻や鼻の脇のくぼみ・眉・顎等の、比較的表情の変化に安定な顔特徴に対応していること、4) 更に、これらの凹凸領域は、顔の表情と認識の研究報告[14]「顔の識別には、表情の変化に依存しない顔特徴を重視すべきである」に一致する、などがある。

以下では、第2章に曲率空間と顔特徴、第3章に主曲率ヒストグラムを用いた顔の表現と識別法、第4章に37個の実顔距離画像を用いた各々の顔識別実験結果と考察、第5章に結論と今後の課題を示す。

## 2 3D 曲率空間における顔特徴

### 2.1 3D 曲率空間

3次元曲面S上の点Pにおける法線 $\mathbf{n}$ をとし、接平面上の*i*方向の接線を $t_i$ とする。 $\mathbf{n}$ と $t_i$ を含む平面 $P_i$ と曲面Sとの交差曲線 $S_i$ の曲率を $t_i$ 方向の法曲率と呼び、あらゆる方向の法曲率のうち、その最大と最小を主曲率 $\kappa_1, \kappa_2$  ( $\kappa_1 \geq \kappa_2$ )、それぞれの接線方向を主方向と呼ぶ (Fig.1 (a))。主曲率の値を定数として決定される接触楕円面を用いて、点Pの局所形状を2次まで近似することができる [15]。ガウス曲率と平均曲率は、主曲率から以下のように定義される。

$$\begin{aligned} K &= \kappa_1 \kappa_2 & H &= \frac{1}{2}(\kappa_1 + \kappa_2) \\ \kappa_1, \kappa_2 &= H \pm \sqrt{H^2 - K} & \kappa_1 &\geq \kappa_2 \end{aligned} \quad (1)$$

最大主曲率 $\kappa_1$ を*x*軸、最小主曲率 $\kappa_2$ を*y*軸、ガウス曲率を*z*軸とした3D空間を、曲率空間とする (Fig.1 (b))。 (1)式より、*xy*平面上の $y = x$ 方向を平均曲率の軸にとることが出来る。ガウス曲率・平均曲率は、曲率空間で主曲率の関数として同時に表示することができる。又、曲率空間の*xy*平面を主曲率平面、平均曲率を*x*軸、ガウス曲率を*y*軸とする平面をガウス・平均平面とする。以下では、曲面を曲面の各点の曲率値を用いて曲率空間へ写像し、得られた主曲率平面及びガウス・平均曲率平面の写像から曲面の形状を分析する。

#### 1. 局所形状による表面点の分類

曲面上の点Pはその主曲率 $\kappa_1, \kappa_2$ の値により、主曲率平面上の一点( $x = \kappa_1, y = \kappa_2$ )に写像することができる。これらの点Pは、その位置( $x = \kappa_1, y = \kappa_2$ )あるいはガウス曲率と平均曲率の符号の組合せから、8種類; 1) 凸楕円点 ( $K > 0, H < 0$ ), 2) 凸放物点 ( $K = 0, H < 0$ ), 3) 凸双曲点 ( $K < 0, H < 0$ ), 4) 極小点 ( $K < 0, H = 0$ ), 5) 凹双曲点 ( $K < 0, H > 0$ ), 6) 凹放物点 ( $K = 0, H > 0$ ), 7) 凹楕円点 ( $K > 0, H > 0$ ), 8) 平面点 ( $K = 0, H = 0$ ) に分類することができる (Fig.1 (c))。又、曲率空間における異なる2点( $\kappa_{1i}, \kappa_{2i}$ ), ( $\kappa_{1j}, \kappa_{2j}$ )の距離は、写像された曲面上の2点の局所形状の近似度に比例する。

#### 2. ガウス曲率と平均曲率

$K$ を定数とみなすと、ガウス曲率 $K = \kappa_1 \kappa_2$ は、主曲率平面上で $y = \frac{K}{x}$ として表示できる。 $y$ の軌跡は第1、第3象限では正、第2、第4象限では負の双曲線となる。つまり、曲面でガウス曲率が等しい点の集合は、主曲率平面上の双曲線に写像される。ガウス曲率を*z*値とすると、ガウス曲率面は曲率空間では双曲楕円面である。主曲率平面においては、 $y = x$ の対角線に沿ってガウス曲率が最も増大し、 $y = -x$ の対角線に沿ってガウス曲率が最も減少する (Fig.1(b))。一方、平均曲率 $H = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2}$ は、主曲率平面上では $y = 2H - x$ の直線となる。曲面で平均曲率が等しい点の集合は、 $y = -x$ に平行な直線上に写像される (Fig.1(c))。

#### 3. 曲率グラディエント

ガウス曲率のグラディエントの方向は、等曲率線、つまり双曲線の接線に垂直である (Fig.1(c))。又、曲面上で、ガウス曲率のグラディエント方向に沿って極値に達する極値探索線 (ガウス曲率の尾根線) は、各双曲線に直交する曲線 (力線) に写像される。平均曲率のグラディエントの方向は主曲率平面上では $y = x$ 方向に一定である。 $y = x$ 上に写像された点では、ガウス曲率・平均曲率のグラディエント方向は一致し、 $y = -x$ に写像された点では両者は直交している。

#### 2.2 曲率空間における顔特徴の分布

NRCC (カナダ国立研究所) の提供する37個の顔距離画像を用い、曲率空間における顔特徴分布を観察した。Fig.4に顔画像全体を示す。顔距離画像から抽出されたガウス・平均・主曲率に基づいて、顔点をそれぞれ主曲率平面、ガウス・平均曲率平面に写像し、曲率ヒストグラムを計算する。例として、Fig.2に、Face12の曲率計算結果とそのヒストグラムを示す。ただし、平均ヒストグラムの*y*軸方向は、 $\sqrt{k}$ とする。両ヒストグラムから、顔点の約90%は、頬や額等に対応する曲率絶対値の小さい平坦点であることがわかる。他の約10%に相当する顔特徴点の分布をTable.1に示した。額、眉、鼻梁、小鼻の順に曲率絶対値が増大し、鼻頂上点で曲率が最大になる。各顔特徴点の曲率の、鼻頂上点の曲率に対する割合をTable.1右列に

示した。Table.2に示すように、鼻頂上点は、最大主曲率 $\kappa_1$ と最小主曲率 $\kappa_2$ の差が小さく、球形に近い局所形状であることがわかる。主曲率空間においては、 $\kappa_1 = \kappa_2$ の対角線付近の凸楕円点で、ガウス曲面が極だつて高い点と特徴づけることができる。又、鼻梁線は、曲率が最も急激に増加し、鼻頂上点で曲率極大点に達するから、曲率尾根線と考えられる。Fig.1(d)に示すように、鼻梁線上の点は、鼻頂上の曲率極大点に向かうグラディエント方向に沿って分布していることがわかる。

### 3 曲率を用いた顔の同定法

#### 3.1 顔の特徴抽出

顔特徴は、顔曲面の本来の局所形状を表す曲率である。入力された顔距離画像から等距離線を抽出し、各等距離線に沿って等間隔にサンプリングした点でガウス曲率、平均曲率、主曲率を算出する[17]。次に各点において抽出された主曲率 $\kappa_1, \kappa_2$ の符号と値に従って主曲率平面へ写像し、2次元ヒストグラムを生成する。照合後の検証の目的のために、ヒストグラムには写像された顔点の位置も併せて記録している。主曲率平面上の異なる二点、 $(\kappa_{1i}, \kappa_{2i}), (\kappa_{1j}, \kappa_{2j})$ が、許容距離範囲内 $(\sqrt{(\kappa_{1i} - \kappa_{2j})^2 + (\kappa_{2i} - \kappa_{2j})^2} \leq \text{許容距離})$ に存れば、この両点の階級は加重平均されて統合される。現在、許容距離は0.002に設定している。

#### 3.2 顔表現

顔点の約90%近くを占める平坦点 $\sqrt{\kappa_1^2 + \kappa_2^2} \leq 0.02$ の曲率値は非常に似かよっているために、曲面の微妙な差異と識別するためには有効な手がかりとならない。そこで、曲率最大点を含む曲率絶対値の大きい部分のヒストグラムを顔の表現とする。この部分は、鼻・眉・顎等の表情の変化に安定な造作に対応している。Fig.3に顔の表現例を示す。曲率空間における原点との距離を $R$ とすると、 $R$ とガウス曲率の関係は、 $\kappa_1 = \kappa_2$ の場合に $(R = \frac{1}{\sqrt{2}})K$ を満たす。Fig.3(a)に $0.0 \leq R \leq 0.02$ の顔特徴点、(b)  $0.02 \leq R \leq 0.045$ の顔特徴点、(c)  $0.045 \leq R \leq 0.65$ の顔特徴点を示した。これらの顔表現として用いられる部分は原ヒストグラムの約8~15%である。

### 3.3 照合と検証

IとMをそれぞれ照合する顔とモデル顔の $n$ 階級(区分)から成る曲率ヒストグラムとする。IとMの $j$ 番目の階級 $I_j, M_j$ の階級値をそれぞれ $X_i = (\kappa_{1i}, \kappa_{2i}), X_m = (\kappa_{1m}, \kappa_{2m})$ とする。

IとMの照合度は以下の式によって求められる。

$$k = \frac{\sum_{j=1}^n \min(I_j, M_j)}{\sum_{j=1}^n M_j}$$

$$\text{ただし、} k = \begin{cases} 1.0 - 0.4 \times \left(\frac{\Delta D^2}{T^2}\right) & \text{if } \Delta D < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta D = \sqrt{(k_{1i} - k_{1m})^2 + (k_{2i} - k_{2m})^2}$$

$T = \text{許容距離範囲}(=0.002)$

$k$ は、 $I_j$ と $M_j$ の曲率値の距離による係数で、 $I_j$ と $M_j$ の $I_j$ と $M_j$ 間距離が、0から許容距離 $T$ の変移に伴って、 $k$ は1.0から0.4の値をとる。上式によって計算される照合度は、照合される顔表面から抽出された曲率と同じ(もしくは近い)値の曲率値をもつモデル顔表面の点の総量を正規化したものである。 $I_j$ と $M_j$ が完全に一致した場合は1.0である。モデルライブラリの各顔モデルに対して、同様に照合度を計算し、照合度の高いモデル顔を候補に選択する。更に、 $I_j$ と $M_j$ に写像された顔曲面上の各点の位置を照合することによって検証を行なう。

## 4 実験と考察

実顔距離画像を用いた顔同定実験を示す。本実験ではNRCC(カナダ国立研究所)が提供する距離画像データファイル[7]に含まれる37個の顔画像を用いた。原データは256x256の大きさであるが、曲率の計算都合上、線形補間法にて1024x1024の画像に拡大したものをを用いた。実験には、Sun4を用い、各顔の曲率及び曲率ヒストグラム計算処理は約7~8分、各顔の同定及び確認は約40~50秒である。

Fig.4(a)に男性(Face12)顔同定の結果を示す。照合度は顔右下の正方形の大きさで表示し、全ての顔を照合度の順に表示した。又、Fig.4(b)にモデルライブラリの各顔に対する全ての顔の同定結果を示す。モデルライブラリの各顔を水平軸、照合する未知の顔を垂直軸に示す。どの同定実験においても対角線上の正四角形が第2位の相関度と50%以上の差があることから、各顔が明確に同定されたことがわかる。今後は、曲率の方向独立性を検証する実験を進める予定である。

## 5 むすび

顔の識別問題を3次元自由曲面の同定問題と設定し、観察方向に不変な特徴である曲率のヒストグラム相関を用いた顔識別法を提案し、実顔距離画像を用いた実験によってその有効性を確かめた。

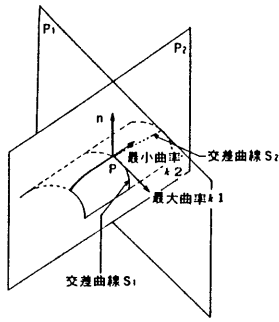
未解決の問題点として、画像の方向依存性に関連した次の2点をあげることができる。

1) 距離画像が観察方向に依存性があるため、画像の特徴を写像した特徴空間も方向に依存する。特に、距離情報を等距離線で入力した場合に等距離線の間隔が疎である程、その影響が大きい。写像空間の方向依存性を解決する写像空間の補間法[13]を考察する必要がある。2) 現在は、曲率値のみに基づいた特徴空間への写像であるため、曲率値が等しい場合は傾き、位置の異なる複数の複数点が曲率空間の同一の1点に写像される。画像空間と特徴空間間の1対1対応に近い写像法が望ましい。

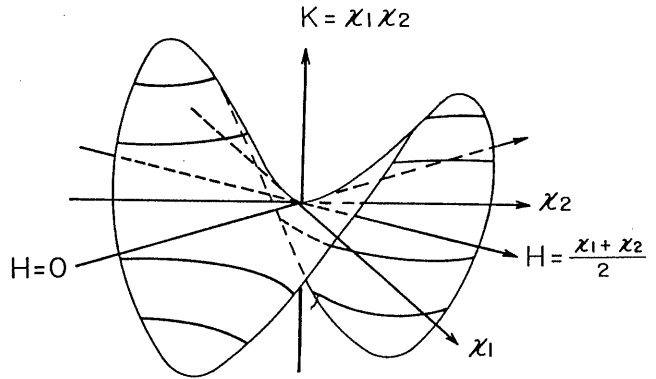
今後は、法線方向や主方向と観察方向の方向差を考慮にした曲率空間への写像方法を検討し、よりロバストな自由曲面認識法、更に再構成法の研究を進める予定である。

## 6 参考文献

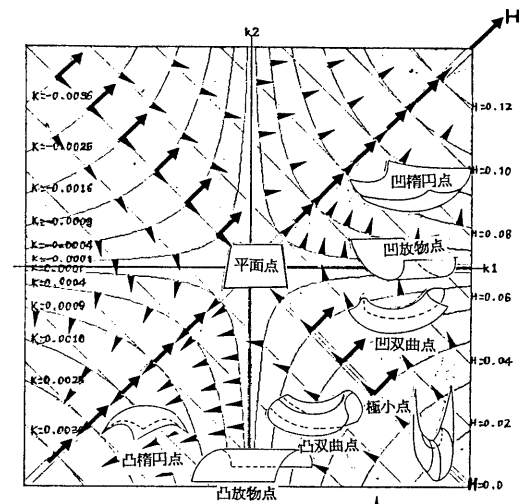
1. 南敏: "顔の識別技術", 計測制御, 25-8, pp.25-31(1986).
2. 坂井利之、長尾真、金出武雄: "計算機による顔写真の解析", 信学論, Vol.56-D, No.4, pp.226-233(1973).
3. L.D. Harmon et al.: "Machine Identification of Human Face", Pattern Recognition, 13-2, pp.97-110(1981).
4. Y. Kaya and Y. Kobayashi: "A Basic Study of Human Face Recognition, Frontiers of Pattern Recognition, Ed. by S. Watanabe, Academic Press, pp.265-289(1971).
5. 加藤雅弘 et al.: "等濃線分布に基づく顔画像の識別", TV学会技術報告, Vol.14, No.36, pp.1-6(1990).
6. 小杉信: "ニューラルネットを用いた顔画像識別の一検討", TV学会技術報告, Vol.14, No.50, pp.7-12(1990).
7. M. Rioux, L. Cournoyer: "The NRCC Three-dimensional Image Data Files", National Research Council of Canada, Division of Electrical Engineering, Ottawa, Canada, K1A0R8, 1988.
8. 末永康仁、渡部保日見: "3D形状と輝度(色)の同時計測が可能なスキャナとその顔画像入力への応用" 情処 CV研究会 67-5, (1990).
9. P. Besl and R. Jain, "Segmentation through Variable-Order Surface Fitting," IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence, Vol. PAMI-10, March 1988, pp.167-191.
10. T. Jan, G. Medioni and R. Nevatia, "Surface Segmentation and Description from Curvature Features," Proc. 1987 Image Understanding Workshop, Los Angeles, Ca. Feb., 1987, pp. 351-359.
11. 横谷直和、マーチン D. 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", 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.8, pp.944-952(1989)
12. J. Cartoux et al.: "Face Authentication or Recognition by Profile Extraction From Range Images". Proc. IEEE Workshop on Interpretation of Scenes, pp.194-199(1989).
13. J. Lee, E. Milios: "Matching Range Image of Human Faces", Proc. '90 Int., Conf., Computer Vision, pp.722-726(1990)
14. 寺村茅: "顔の表情とその認識に関する研究", 信学技法, PRL-81-72, pp.41-47(1981).
15. M. P. do Carmo, Differential Geometry of Curves and Surfaces, Prentice-Hall, 1976.
16. H.T. Tanaka et.al."Representing Surface Curvature Discontinuities", Proc.3rd ICCV, pp.304-308(1990)
17. H.T. Tanaka et.al."On Surface Curvature Computation From Level Set Contours", Proc.10th ICPR, pp.155-160(1990)



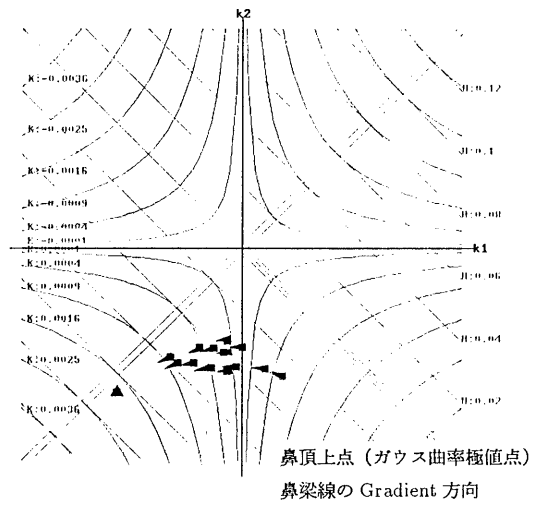
(a) 主曲率



(b) 曲率空間におけるガウス曲率と平均曲率



ガウス曲率 Gradient 方向  
平均曲率 Gradient 方向 ↑  
等ガウス曲率線・等平均曲率線と Gradient 方向



(d) ガウス曲率極値探索線 (鼻梁線)

Fig.1 曲率空間

顔特徴	$R = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$	$R/R_{max}$
あご、まゆ、鼻梁、脇くぼみ	$0.02 \leq R \leq 0.03$	0.33~0.5
鼻梁、まゆ	$0.03 \leq R \leq 0.04$	0.5~0.66
鼻頂上付近、小鼻	$0.04 \leq R \leq 0.045$	0.66~0.75
鼻頂上	$0.045 \leq R_{max} \leq 0.07$	1.00

Table1. 曲率空間における顔特徴分布

区分	主曲率		$k_1$		$k_2$		$R = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
子供(女)	0.044	0.051	0.054	0.055	0.065	0.070		
女性	0.033	0.041	0.038	0.048	0.050	0.063		
男性	0.024	0.040	0.031	0.046	0.040	0.061		

Table2. 顔曲面のガウス曲率極大点の主曲率

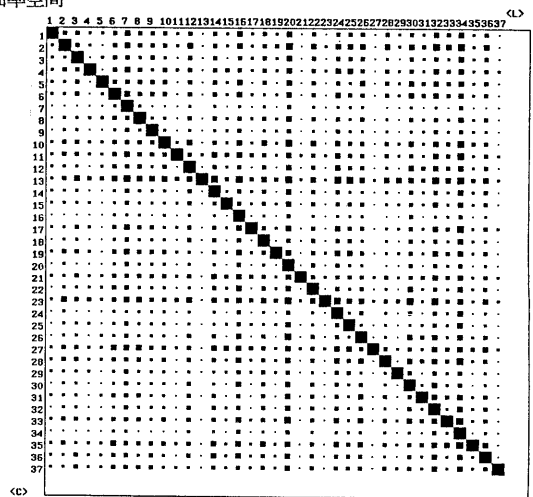


Fig.4 (b)37個の顔識別結果

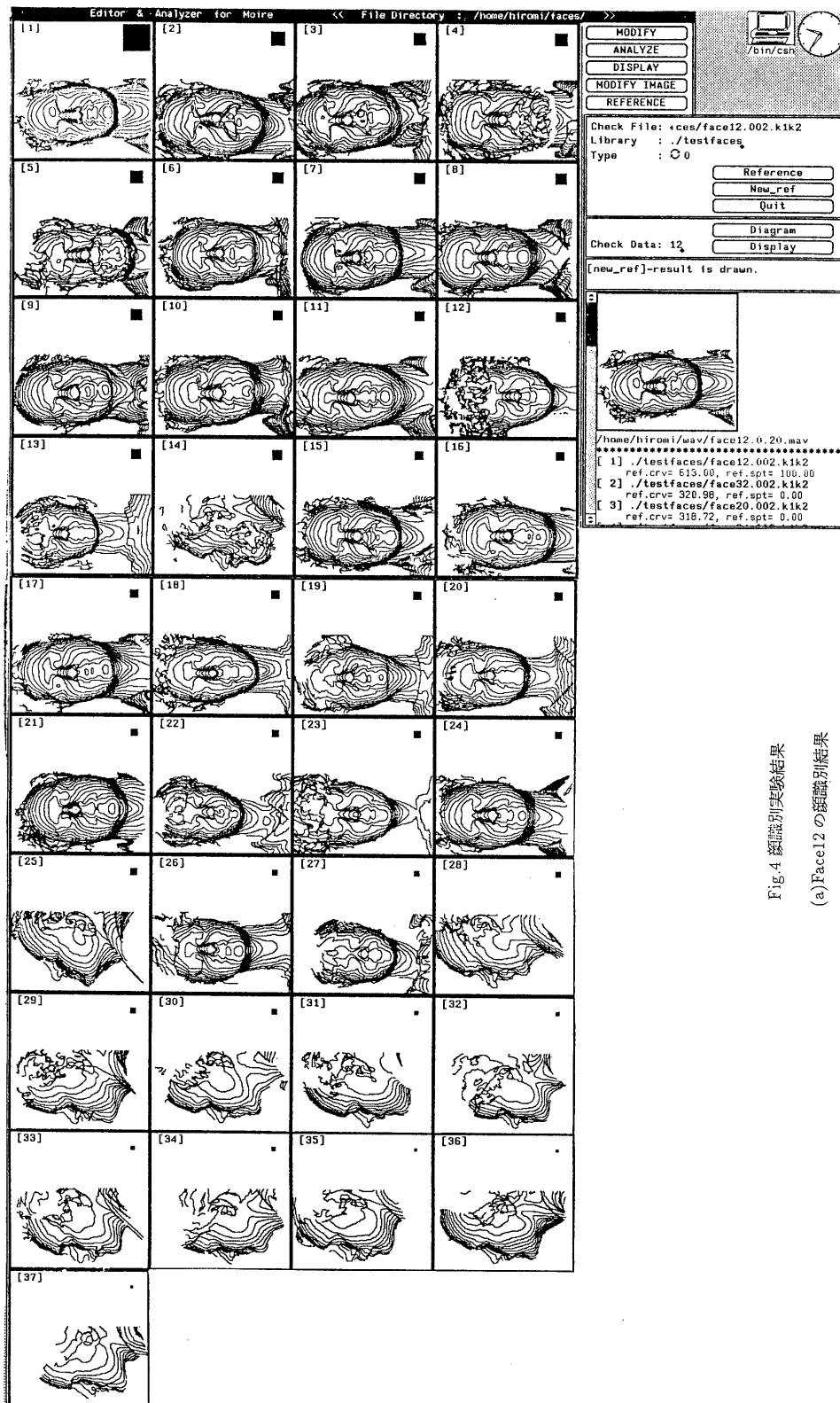
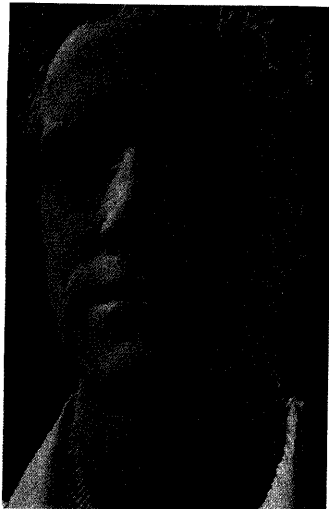
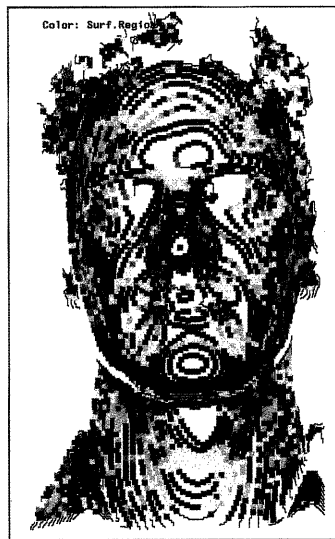


Fig.4 顔識別実験結果  
(a)Face12の顔識別結果



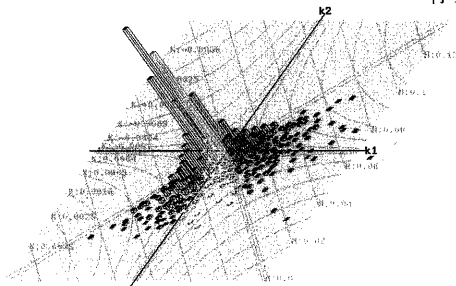
(a) Face12 の原顔距離画像



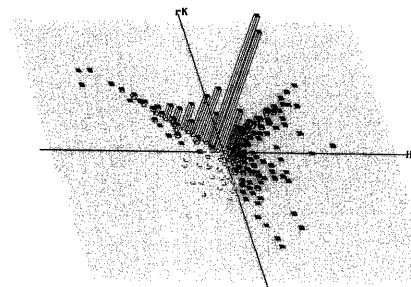
(b) 主曲率  $\kappa_1, \kappa_2$  の曲率計算結果:  
符号に基づく顔表面点の分類



(c) 主曲率と主方向の計算結果:  
最大最小曲率方向

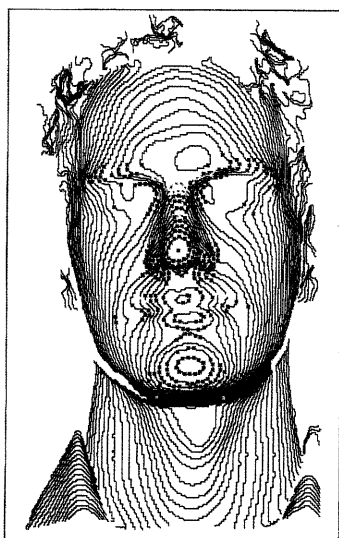


(d) 主曲率空間 ( $\kappa_1, \kappa_2$  空間):  
主曲率ヒストグラム

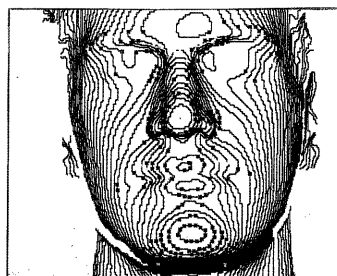


(e) ガウス平均曲率空間 ( $\sqrt{KH}$  空間):  
ガウス / 平均曲率ヒストグラム

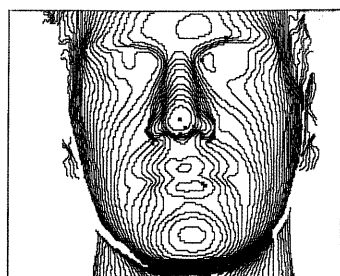
Fig. 2 主曲率空間における顔特徴



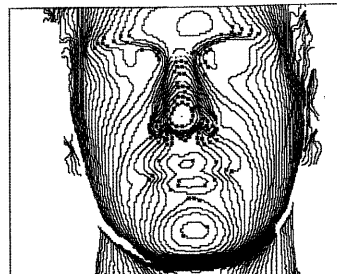
(a) 曲率の大きい顔表面点:  
 $0.02 \leq R = (\sqrt{\kappa_1^2 + \kappa_2^2}) < 0.065$



(b) 曲率の大きい顔表面点: $0.02 \leq R < 0.03$



(d) 曲率の大きい顔表面点: $0.045 \leq R < 0.065$



(c) 曲率の大きい顔表面点: $0.03 \leq R < 0.045$

Fig. 3 曲率極値(極大)点と曲率の  
大きい顔表面点における顔特徴