

## 画像処理による顔検出と顔認識

岩井儀雄<sup>†</sup>, 勞世竈<sup>‡</sup>, 山口修<sup>\*</sup>, 平山高嗣<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科

iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

<sup>‡</sup> オムロン株式会社

lao@ari.ncl.omron.co.jp

<sup>\*</sup> (株) 東芝研究開発センター

osamu1.yamaguchi@toshiba.co.jp

<sup>††</sup> 京都大学大学院情報学研究科

hirayama@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

画像処理による顔情報処理に関連した研究について, 1) 顔検出法, 2) イメージベースの顔認識法 3) モデルベースの顔認識法, という観点に基づき最近の動向を紹介する.

## A Survey on Face Detection and Face Recognition

Yoshio Iwai<sup>†</sup>, Shihong Lao<sup>‡</sup>, Osamu Yamaguchi<sup>\*</sup>, Takatsugu Hirayama<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University

iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

<sup>‡</sup> Omron Corporation

lao@ari.ncl.omron.co.jp

<sup>\*</sup> TOSHIBA Corporate Research and Development Center

osamu1.yamaguchi@toshiba.co.jp

<sup>††</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University

hirayama@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

In this paper, we survey research on facial image processing. We explain the followings: 1) face detection, 2) image-based face recognition, and 3) model-based face recognition.

### 1 はじめに

人間は, 視覚によって顔から多様な情報を読み取ることが出来る. 例えば, その人物が誰であるか, 性別, 年齢, 感情, 意図などを人間はいともたやすく読み取っている. このような顔情報を計算機が読み取ることが出来れば, 様々な応用が考えられる. そこで, コンピュータビジョン分野では, 顔画像処理が 1970 年代ごろより始まった [153, 152]. 顔情報の応用として, 個人同定や, テレビ電話, 遠隔会議, QOL 判定, ユーザインターフェイスなどが考えられるため, 80 年代後半から 90 年代には盛んに研究され, 様々

な顔検出手法や顔認識手法が提案された [18, 25]. 90 年代後半には, セキュリティ応用を目的として, より高速で安定した顔検出, 認識手法が提案され, 既に商品化されている [55, 159, 54]. また, 顔認識, 顔検出に関する多数のサーベイ論文も出版されている [18, 3, 29, 211, 218].

顔研究は, 顔検出, 顔器官検出, 顔認識 (同定と照合), 表情認識, 顔姿勢推定, 年齢推定, 男女判定, アクセサリー検出など多岐にわたる. その中でも顔検出法は, 画像中からの顔位置, 顔領域を発見するために, 全ての顔情報処理で最初に行われる重要な処理であり, 高速かつ安定な手法が求められる. また, 心

理学における人間の顔の認識に関していえば、顔を全体として認識しているのか、顔器官（特徴量）の集合として認識しているのかという問題がある。工学的な顔認識処理についても、それぞれの立場に立った顔認識手法として、全体照合 (holistic matching) によるイメージベース手法、特徴照合 (feature matching) によるモデルベース手法とに分かれている。そこで、このサーベイでは特に

- 顔検出 (2章:担当 勞)
- 顔認識 (image-based) (3, 4, 5章: 担当 山口)
- 顔認識 (model-based) (6章: 担当 平山, 岩井)

に分類して、各手法について紹介する。

顔認識処理には、パターン認識や、統計的意志決定の理論や技術が利用されるが、顔検出における顔かどうかの検証処理は顔か否かの2カテゴリ識別問題であるので、顔認識の技術（多カテゴリ識別問題）が利用できる。また、顔検出の場合にはシステム出力が顔の矩形領域や輪郭情報であったりして検出成功条件、顔検出率、顔検出精度が論文毎に異なっているので、手法を比較する際には注意が必要である。顔を矩形領域として検出する場合には、Yangらによれば

1. 顔の部分画像であれば全部成功
2. オクルージョンされていない目と口が含まれていれば成功
3. オクルージョンされていない目と口が含まれていて、ground truth (通常は手で与えられる) の矩形領域と比較して大きさと中心位置が一定範囲内であれば成功

という基準が挙げられている [210]。

顔認識は、顔同定 (identification) と顔照合 (verification) に分かれる。同定の場合、出力は顔画像の人物が誰であるかという名前情報である。また、照合の場合は、追加入力として入力した顔画像が誰であるかの情報が与えられ、データベース内の情報と照らし合わせて、一致するか否かの2カテゴリ判定結果を出力する。一般に、顔照合より顔同定の方が難しい問題となる。また、Face Recognition Vendor Test (FRVT2002)[43, 133] には、Watch list という同定と照合との両方を一般化した評価方法が定義さ

れてある。評価基準は、顔データベースにおける他人受入率 (FAR) と本人拒否率 (FRR) などがある [81]。顔データベースは現実世界からの一様サンプリングが理想であるが、実際に、そのようにサンプリングするのは難しいので広く利用されているデータベースを利用する。そこで、参考として7章で様々な論文で利用され、一般に公開されている顔画像データベースについて紹介する。

## 2 顔検出

### 2.1 顔検出技術とその重要性

画像の中から、人の顔を自動的に見つけ、その位置と大きさを出力するのが顔検出である。顔を正確に検出することは顔認識、顔年代性別推定、顔状態推定、表情認識など様々な顔画像処理を行うのに必要不可欠な機能である。テレビ電話などのビデオ画像通信の中で、顔検出によって顔の部分に対して背景部分と異なる圧縮パラメータを使うことで顔の部分の画質の向上が可能になる。監視カメラにおいては顔検出によって、カメラが自動的に人の顔をズームアップすることもできる。デジタルカメラやビデオカメラが急速に普及している中で、顔検出によるオートフォーカスやオートアイリスに対するニーズもあり、顔検出技術の役割がますます重要になってきた。

顔検出は物体認識技術の一特例として、学術的にも研究する価値が高い。目、口そして鼻を有するところはほとんどの顔が共通である。しかしながら、異なる人は異なる顔を持つ。同じ人の顔でも表情、化粧などによって見た目が変化する。当然照明環境によっても変化する。顔の多様性が顔検出に難しさをもたらした。顔検出に関する研究はその他の物体検出技術（例えば、歩行者や車の検出）の発展に役立つ。したがって、顔検出技術は広い応用分野を有する重要な研究テーマだと言える。

### 2.2 顔検出技術の研究概要

顔検出の実用性の高さや学術的な研究テーマとしての面白さに惹きつかれて、様々な研究グループがこのテーマに取り込んできた。その中で、米国のカー

ネギーメロン大学, MIT, UIUC のグループが長年にわたって顔検出の研究に取り込んできた。パターン認識や画像処理の国際学会(例えば, ICCV, CVPR, ICPR, ICIP)においては毎年大量の論文が発表されている。IEEE PAMI, Pattern Recognition などのパターン認識や画像処理の著名な論文誌においても顔検出の論文が多数発表されている。

Chellappa ら [18] は 1995 年のサーベイにおいて, それまで 20 数年間に渡る顔認識の研究成果をまとめた。その中で, 顔検出に関する簡単な記述がある。Yang ら [211] と Hjelmas ら [29] はそれぞれのサーベイの中で 2000 年までの顔検出の研究に関する調査をまとめてある。近年も顔検出の新しい手法が多く開発されている。検出対象も正立の正面顔から画像平面内の回転への対応と横顔への対応と広げてきた。

顔検出の手法は大きく以下の 2 つの部分に分類できる:

1. 経験則に基づく手法
2. 統計学習手法に基づく手法

特に, 近年は (2) の統計学習手法に基づく顔検出の技術の発展が著しい。本論文では, 簡単に (1) の経験則に基づく手法を紹介してから (2) の統計学習手法を紹介する。最後に, 顔検出の画像平面内の回転の対応 (Rotation In Plane 以下回転対応) と首の上下左右方向の回転による顔向きへの対応 (Rotation Out of Plane, 以下向き対応) について紹介する。

検出対象によっては, 顔検出は静止画顔検出と動画顔検出に分けられる。また, 画像に一人だけの顔が存在する場合, その位置を検出することを顔位置推定 (face localization) と呼ぶこともある。本論文では, 主に静止画を対象として, 人数や背景の限定がない一般的な顔検出について述べる。

顔検出の最も基本的な考え方は入力画像の中に特定の位置と大きさのサブウィンドウを切り出して, そのサブウィンドウが顔かどうかを判別し, 全画像においてさまざまな位置と大きさのサブウィンドウをスキャンすることによって画像の中の顔を検出する。通常, 画像の中に大量のこのようなサブウィンドウに対して顔かどうかの判別を行うため, 顔検出の計算量は非常に大きい。

## 2.3 経験則に基づく顔検出手法

初期の顔検出の大部分は経験則に基づく顔検出に分類できる。これらの手法はエッジ, テクスチャー, 色成分, 顔のパーツの位置関係などを特徴量として抽出し, 経験的に求められたルールやモデルによって顔かどうかを判定する。これらの手法は比較的少ない特徴量によって論理判断を行うため, 速度が速いという利点があるが, 経験則が作られる環境にしか適応できず, 適応能力が低いのが欠点である。また, 性能の良い顔検出器を構築するには特徴量の選択からルール作成まで経験と熟練が必要で, システム的な開発手法が無いのも難点である。

以下, 顔検出技術の発展を垣間見るために, いくつかの経験則に基づく顔検出技術を紹介する。

### 2.3.1 エッジベースの顔検出

エッジは画像処理に最も古くから使われてきた重要な特徴量の一つ。顔(頭部)の輪郭は近似的に楕円と見ることができる。目と口の形もほぼ細長の形をしている。このような顔の形のテンプレートを作って, 画像の中から顔を探す方法が多く発表されている。

Chellappa らのサーベイによると, 顔検出技術として最も古い文献の一つは京都大学の Sakai ら [151] が 1969 年発表した論文である。この論文もエッジを使った顔検出手法を使っていた。顔の輪郭に相当する楕円, 目, 口および鼻の部分にはエッジがある領域, 額および頭部上の部分にはエッジがない領域として顔のモデルを定義している。Govindaraju ら [41] は変形可能なテンプレートを使ってエッジ画像の中から, 顔の輪郭とマッチングを取り, コスト関数の値を計算することで顔候補を見つける。この手法は少し複雑な背景に対応できた。Maio ら [110] は微分演算子を使ってエッジの方向図を作成する上, 一般化 Hough 変換を使って予め用意した 12 種類の顔テンプレートとマッチングを行う。

### 2.3.2 輝度分布による顔検出

顔はその内部の細かいところはそれぞれ異なるが, 大雑把に見ると, 大体目や口の部分の輝度が低く, 頬や額の部分が輝度が高い。このような輝度の分布規則を利用して顔を検出する手法も古くから提案され

ている。

Yang ら [202] は顔の輝度分布の特徴に注目し、モザイク画像 (Mosaic Image) による顔検出手法を提案した。この場合、顔の領域を  $4 \times 4$  あるいは  $8 \times 8$  のモザイクに分け、その中の輝度分布とエッジ情報を使って粗い探索と密な探索を行う。また、テクスチャーを使う方法もある。Dai ら [24] は Space Gray-level Dependence Matrix (SGLD) を使って顔のテクスチャーを表す方法を提案している。

これらの手法は眼鏡の反射やひげの濃い人など特殊なケースに対してロバスト性が悪い。

### 2.3.3 顔の対称性を考慮した顔検出

正面顔の場合は、大抵の場合は顔の左右が対称だと考えることができる。この特徴を使って顔検出を行うことも提案されている。多くの場合はまずエッジの集合を検出し、それから隣接する領域の相関を計算することで対称性を判断する。

Kondo ら [73] は Haar Wavelet を使って画像の水平と垂直のエッジ点の勾配方向を算出し、これを使って対称性を計算し顔領域を決めていく。Sun ら [175] の方法は対称性と肌色情報を使った手法を提案した。

これらの手法は顔の回転に対応できるメリットがあるが、照明変化、向き変化によって顔が対称でないケースには対応できない欠点がある。

### 2.3.4 顔の器官検出による顔検出

エッジなどのローレベルの特徴量と比べて、顔器官を検出できれば、各顔器官の相互関係で検証してよりロバストな顔検出が実現できる。

Leung ら [91] は 5 つの顔器官 (両目、両鼻孔と口) の距離分布のガウス分布モデルを作った。検出時、まず画像の中から器官をマッチングするフィルタを使って各器官の可能な位置を見つけ、統計モデルで最も可能性の高い顔器官の組み合わせを見つける。Yow ら [214] は目や口の位置を DOG 演算子で見つけ、マハラノビス距離による判別器で大部分の候補を除去したあと、Bayesian Net 使って最終判断を行う。Smeraldi ら [172] は人間の視覚のメカニズムを模倣した顔と顔器官を見つける手法を提案した。この方法は中心部分が密度が高く、中心から遠い場所は密度の低いサンプリング点を設け (Retinal sampling)、その Gabor

Wavelet 係数を使って特徴量テンプレートを構成する。検出するときはテンプレートと画像の相関の勾配に従って探索を行う。この手法は顔と顔器官両方の検出に使うことができる。

顔器官検出による手法のキーは顔の器官を如何に正確に検出できるかに係っている。複雑背景の場合は検出される顔器官候補が多すぎるため、機能しないことが多い。

### 2.3.5 肌色検出による顔検出

カラー画像を対象とした場合、顔の最も重要な特徴の一つはその肌色である。肌色は顔の表情、回転角に不変な特徴である。初期の実時間顔検出のほとんどは肌色検出を使っている。肌色を特徴とする検出手法の基本的な考え方は、まず特定の分離性能の良い肌色空間の中で、肌色モデルを構築し、これを使って肌色である可能性の高い各画素を検出し、さらにこれらの肌色画素を色と位置の相関関係から顔の領域に属する肌色領域を算出する。

Yang ら [204] は肌色を使った顔トラッキング技術を開発した。顔領域の初期化は手作業で指定する必要があるが、指定した後は自動的にモデルを更新するため、照明変化にもロバストな顔トラッキングが実現した。Pentium II 200MHz の時代で実時間顔の顔トラッキングを実現している。呉ら [195] はファジイパターン照合による色彩画像から個数、サイズ、位置、姿勢が任意の顔の検出法を提案した。更に、色彩動画像からの頭部ジェスチャーの認識法 [196] を提案し、肌色領域、髪色領域の一次、二次モーメントに基づいて入力画像にある頭部の 3 次元姿勢を推定する。推定された X, Y, Z 軸回りの回転角度と肌面積を頭部の動作を理解するための特徴量として用いる。Terrillon ら [180] は RGB, HSV など 9 種類の色空間の中で、肌色の分布モデルを比較し、肌色の分布を表すには混合ガウスモデルが良いことがわかった。

肌色を使うことで高速に大部分の背景を除去できる。勞ら [86] は肌色を顔検出ではなく、明らかに顔が含まれない領域を除去する前処理として使うことで、顔検出の高速化を実現した。

### 2.3.6 モーション検出に基づく顔検出

ビデオ映像の中で、モーション検出を用いて運動物体を検出することができる。背景の変化が無く、顔の動きだけが存在する場合はモーション検出によって顔を見つけることができる。モーション単独では顔かどうかを判別できないため、モーションと肌色などの情報を一緒に使用するケースが多い。

Kapfer[68] は色、モーションと形状モデルで動画の中の顔を検出し、低い転送速度のネットワークでのテレビ電話用の画像圧縮に応用した。Crowley[23] は目の瞬きと肌色領域およびその形状で顔を検出する方法を提案した。

## 2.4 統計学習に基づく顔検出

統計学習に基づく手法は顔検出を顔と非顔の2クラスのクラスタリング問題とする。これらの手法は一般的に大量の顔と非顔の学習サンプルを使って判別器を構築し、その判別器を用いて画像の中のすべてのサブウィンドウに対して顔かどうかの判別を行うことで顔検出を実現している。

統計学習に基づく手法は顔と非顔を区別するための特徴量、そしてモデルのパラメータはサンプル画像を使った学習によって得られる。人が経験的に選んだものではないため、より一般性の高い特徴量と判別基準を得ることができる。また、サンプル画像を増やすことによって検出の性能を向上させることがより簡単にできる。複雑背景の中から顔を検出する場合は統計学習に基づく手法が欠かせない。

以下、判別器の設計法によって顔検出手法を分類し、それぞれを紹介する。

### 2.4.1 線形部分空間分析法

パターン空間の中では、顔は極小さい一部の空間にしか占めていない。従来のパターン認識理論の中で使われてきた主成分分析 (PCA)、線形判別分析 (LDA)、独立成分分析 (ICA) などの手法が顔の部分空間の構築に使われている。

PCA 変換は顔の認識に使われる [181] 以外、顔検出にも使われている。Sung と Poggio[176] は非顔サンプルの学習を取り入れ、顔と非顔をサンプル空間の中でのそれぞれ  $n$  個のクラスタに分け、各クラス

はガウス分布と仮定し、それぞれに対して PCA を使って次元削減を行う。検出を行う時には  $2n$  個のクラスタとの中心距離を計算し、識別を行う。Sung のもう一つの重要な貢献は非顔サンプルを集める仕組みとして、Bootstrap の手法を導入したことである。すなわち、最初の学習には非顔サンプルデータ  $A_1$  を用意する。顔サンプルデータ  $F$  と学習を行う。得られた検出器  $D_1$  を使って誤検出のデータを集める。それで得た誤検出サンプルデータ  $A_2$  をさらに非顔データとして使い ( $A_1+A_2$ ) と  $F$  を使って更に顔検出の学習を行う。このプロセスを繰り返すことで、誤検出の少ない検出器を構築できる。この非顔のサンプルデータを収集する手法は Rowley や Viola らの研究にも使われるようになった。Li[92] は Sung の方法を改良し、 $2n$  個のクラスタ中心との距離に対して LDA 変換を行い、変換した距離を更にニューラルネットワークに入力して判別を行う。PCA の他に Qi ら [140] は ICA と SVM を使った手法を提案した。

PCA と ICA は信号の再構築の視点から顔の表現を考えるが、顔と非顔を識別するための有効な特徴をどう選ぶのを考慮していない。Yang ら [207] は自己組織マップ (SOM) を使って顔と非顔をいくつかのクラスタに分け、LDA を使って顔と非顔を識別する特徴量を抽出する方法を提案した。

### 2.4.2 ニューラルネットワーク法

ニューラルネットワークは複雑で、明示的に記述できないモデルを表すに有効な手法である。ニューラルネットワークを使った顔検出手法はネットワークの学習によって、顔のパターンの特性をニューラルネットワークの構造とパラメータに組み入れる手法である。学習したニューラルネットワークは顔のパターンが入力された場合 1 を出力し、顔でないパターンが入力された場合は 0 を出力する。Propp ら [138] は早い時期に顔検出をニューラルネットワークで試みた。その後、Burel ら [17] は Kohonen ネットワークを使ってまず顔と非顔のサンプルのベクトル量子化を行い、それから多層ネットワークを学習する手法を使う。Lin ら [100] は確率決定論に基づくニューラルネットワーク (Probabilistic Decision-Based Neural Network, PDBNN) で顔を検出する手法を提案した。

顔検出で最も著名なニューラルネットワーク方式の手法は Rowley と Kanade[147, 145, 146] が開発し

た．この方法は性能が良く，速度も速いのが特徴である．Rowley が開発した顔検出の様々な手法は現在でも多くの研究に使われている．図 1 に Rowley のニューラルネットワークによる正面正立顔の検出の流れを示す．まず，様々な大きさの顔を検出するために，入力画像を一定比率で繰り返し縮小して作ったピラミッド画像を用意する．検出時はこのピラミッド画像の中から 20x20 のサブウィンドウを切り出し，ヒストグラム均等化などの照明補正を行う．それから BP 法で学習した 3 層ニューラルネットワークを使って顔かどうかを判別する．検出性能を向上させるために Rowley は同じ顔サンプルセットと複数の非顔サンプルセットで複数の顔検出器を構築し，これらの顔検出器の出力を“仲裁”することで最終結果を出す．これによって検出性能を向上した．

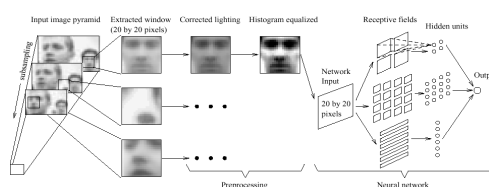


図 1: Rowley の顔検出器 [147]

その後，Ferand[34] と Roth[144] はそれぞれ CGM (Constrained Generative Model) と SNoW (Sparse Network of Windows) を使った顔検出器を開発した．SNoW による顔検出は非常に良い検出性能が得られると報告されているが，検出速度が遅いため，実用的な手法とは言い難い．

### 2.4.3 SVM 法

サポートベクターマシン (Support Vector Machine, SVM) は統計学習理論から生まれた新しいパターン認識方法である．一般的に，SVM はニューラルネットワークよりも高い汎化能力を持つ．

Osuna ら [127] は最初に SVM を顔検出に応用した．Rowley のとほぼ同じフレームワークを使ったが，検出率がニューラルネットワークとほぼ同じの場合，誤検出が低い．直接 SVM を使って顔検出を行う場合，主に 2 つの課題がある：1) SVM の学習は大規模な 2 次計画問題を解く必要があり，膨大なメモリ量と学習時間を要する．2) 大量のデータで学

習を行った場合，得られるサポートベクターの量が多くなり，検出速度が遅い．Platt[135] が Sequential Minimal Optimization (SMO) 法を提案し，1) を解決した．Sahbi ら [149] は Coarse-to-Fine の SVM 識別器の設計方法を提案した．SVM の学習で得られたサポートベクターを空間の中でクラスタリングを行い，そのクラスタの中心を新しいサポートベクターとする．クラスタの中のサポートベクターの数をコントロールすることで，Coarse-to-Fine の識別を実現し，SVM の高速化を可能にした．

### 2.4.4 確率密度推定法

顔と非顔を多次元のベクトルとして，空間の中で特定の分布モデルに従うと仮定する．パラメータ推定の手法でパターン分布密度  $p(x|face)$  と  $p(x|nonface)$  を推定し，それから Bayes の決定ルールで顔かどうかを判別する．この手法の代表的な研究は Schneiderman ら [165, 163, 164] が提案した顔検出手法である．Schneiderman は顔を 4 つの領域に分割し，それぞれ独立と仮定する．各領域において PCA を使って特徴量を計算し，4 領域における顔らしさの積で顔かどうかを判別する．Schneiderman はまたこの手法を Wavelet 変換で抽出した特徴量を使って，横顔検出できる顔検出器を開発した．この手法は MIT と CMU のテストデータセットで誤検出数が 88 のときに 93 % の高い検出率を得ている．

### 2.4.5 AdaBoost 法

AdaBoost[35] は任意の弱判別器を組み合わせるより性能の高い強判別器を構築する手法である．SVM と同様，AdaBoost で構成される判別器も高い汎化能力を有する．

AdaBoost を使った顔検出に関しては Viola と Jonse [185, 64, 184] の研究が有名である．Viola らの手法には 3 つの特徴がある：1) 積分画像を使って高速に計算できる Haar タイプの矩形特徴量 (rectangle feature) を特徴量とする (積分画像を使えば領域の大きさによらずに一定の計算量でその領域の平均輝度を計算できる．この手法は古くから使われている)．2) 1 つの特徴量で 1 つの弱判別器を構成し，AdaBoost を使って，有効な弱判別器を選び出し，その線形結合でより判別能力の高い強判別器を構成す

る．3) 複数の強判別器を直列的に繋ぎ、カスケード (Cascade) 型の顔検出器を構成する．このカスケード型の検出器はまず前の層の単純な検出器を使って顔かどうかを判別する．明らかに顔ではないものはその場で除去する．そうでないものはより高い識別能力を有する後の層のより複雑な判別器を使って判定を行う．基本的にはこれも Coarse-to-Fine 型判別器の一種とみなすことができる．高速に計算できる特徴量と、大部分の領域を計算量の少ない前の層の検出器で判別できる仕組みを有するため、この手法が他の顔検出手法より高速に顔を検出することができる．彼らの実験では PentiumIII 700MHz のマシンで、384x288 サイズの画像を対象とした時、15FPS の速度を達成した (これは Rowley のシステムの約 15 倍の速度にあたる)．図 2 に Viola と Jones のカスケード型検出器を示す．

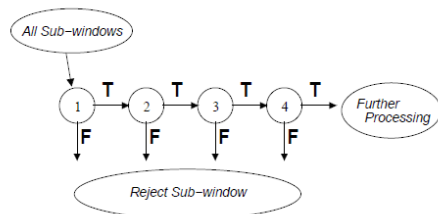


図 2: カスケード型検出器 [185]

Viola と Jones の成功に触発されて、様々な改良手法が報告されるようになった．これらの手法は Viola と Jones のフレームワークの中の 3 つの部分すなわち AdaBoost アルゴリズム、Haar タイプの特徴量とカスケード型の検出器構造に対して改良を加えている．

Li ら [96, 93, 95, 94] は AdaBoost の学習は欲張り法の一つで、特徴量を増やしても、必ず性能が増える保証がないことに注目した．彼らは Floating Search[139] の考え方取り入れ、FloatBoost という手法を開発した．これによって学習の過程での単調増加の条件を満たすことができる．同じ学習データを使って学習した場合、FloatBoost で学習したものの性能が良く、しかも必要な特徴量が AdaBoost の 2/3 にすぎない．しかしながら、FloatBoost の大きな欠点はその学習の計算量が AdaBoost よりはるかに大きいことである．

Liu と Shum[102] は AdaBoost の学習の中で、最

適な特徴量をどのように作るかに着目し、Kullback-Leibler Divergence を判断基準とした特徴量を求める手法 Kullback-Leibler Boosting (略して KLBoosting) を提案した．KLBoosting で求めたわずか 450 の KL 特徴量で Viola ら [185] の 6061 個の Haar タイプの特徴量を使う検出器の性能を超えた．しかしながら、KL 特徴量一個一個の計算量が非常に多いため、全体的な計算コストはむしろ Viola ら [185] の手法より多い．

Jiang と Loe[63] は学習サンプルを分割統合するアルゴリズム S-AdaBoost を提案した．このアルゴリズムはまず入力空間を幾つかのサブ空間に分割し、それぞれのサブ空間でそれぞれの判別器を学習する．最終的に結合器を使って結果を統合し出力する．S-AdaBoost はクラスター外にある特殊パターン (outlier) に対して特別な検出器を追加する仕組みを持っている．

Ma と Ding[107, 108] も AdaBoost に対して改良を加えて、Cost Sensitive AdaBoost (CS-AdaBoost) のアルゴリズムを提案し、顔検出に応用した．従来の AdaBoost では、ポジティブのサンプルとネガティブのサンプルの初期重みは同じであり、顔と非顔のサンプルを同様に扱われる．しかし実際物体検出を行う場合、それぞれのサンプルの重要度が異なるのが普通であり、多くの場合はすべての顔を漏れなく検出してほしい．このような場合、顔のサンプルが非顔のサンプルより重要であると考えられる．CS-AdaBoost では各サンプルにそれぞれの初期重みを付与することでサンプルの重要度に応じた学習を行うことができる．

Xiao ら [198] は Viola と Jones の Cascade 型の検出器構造を変えた顔検出手法 Boosting Chain を提案した．Viola と Jones の Cascade 型の顔検出器の各層独立に学習を行う．Boosting Chain は  $k-1$  層を  $k$  層の一部と見なして学習を行い、それによってより少ない弱判別器で Viola と Jones の手法より検出性能の高い検出器を構築した．

Viola と Jones[64] は 4 種類の Haar タイプの単純な特徴量を提案したが、それ以外の特徴量も使われてきた [99]．

## 2.5 顔検出の回転対応と向き対応

最も単純な顔検出は正面正立の顔の検出である。しかしながら、実アプリケーションの中で、顔の回転や向きに対応する必要がある。図3に各種の顔検出の例を示す。



図 3: 顔検出の種類

顔の回転対応は画像を回転する方法と回転顔に対応した検出器を構築する方法がある。画像を回転させる方法は1つの検出器を構築すればよいという利点があるが、その欠点は計算量が大きく、誤検出の確率が高いことである。Rowley[145]は顔の回転角を推定するニューラルネットワークを導入することで回転対応を実現した。この方法の問題点は回転角の推定器の精度によって検出性能が大きく左右されることである。

Rowleyの方法と同じ、JonesとViola[64]も回転に対応した顔検出器を開発した。ただ顔の回転角推定器はニューラルネットワークではなくて、Haarタイプの特徴量に基づく木構造識別器である。MaとDing[107]もCS-AdaBoostに基づく回転対応顔検出器を開発した。

勞ら[86, 33]は12個の回転角に対応した検出器を構築し、検出器の高速化を行うことで、実時間の360°回転対応顔検出を実現した。それぞれの回転角に対応した検出器をもつことで高い検出性能を維持できる。

回転対応よりも難しいのは顔の向き対応である。Rowleyの論文[146]には向き対応に関する記述があるが、本格的な向き対応はSchneidermanとKanade[163, 164]の研究が初めてである。

Liら[93, 97]はSVMを用いた顔向き対応の顔検出を試みた。彼らはSupport Vector Regression手法を使って顔の向きを判別する手法を取り入れた。まず、顔向き推定を行い、それから推定された向きの顔検出器を使って顔検出を行う。このSVRの顔向き

推定精度がネックになる。

これらの向き対応の顔検出手法の共通な欠点は計算速度が遅い。Liらは[96]ViolaとJonesの手法を改良し、実時間で顔向きに対応したシステムを開発した。これは顔の向きを階層的に対応するピラミッド型の検出器である。JonesとViola[64]、MaとDing[108]もそれぞれBoostingベースの顔向き対応顔検出を提案している。最も難しい顔検出は顔の回転と向きを同時に対応した全方向対応顔検出である。勞ら[87]が提案した手法は前の層の出力を後ろの層の入力に繋がる入れ子型Cascadeの構造を有し、その学習にはReal AdaBoost[162]を取り入れた。顔の向きには正面、左右半横顔、左右横顔5種類の向きに対応した検出器、そして12個の回転角に対応した合計60個の検出器による全方向の顔検出を構築した。筆者の知る限り、これが唯一の全方向対応リアルタイム顔検出システムである。

## 3 Image based recognition

これまで画像に基づいた多くの顔認識(個人識別)の方法が提案されており、図4に、その変遷を示す。1章で述べたように、方法は大きく2つに大別できる[16]。1つは、幾何学的特徴ベースの方法で、顔の部分的な構造の特徴(配置、距離)などを用いるものである(図4(a)(b))。1970年の大阪万博住友児童館において人間の顔の認識と性格判断のショーが行われた[153][150]。この万博で収集された約1000名のデータベースを用いて、画像の入力から個人識別を行う一貫したシステムが金出[67]によって開発された。もう1つは、主として見え方ベースの方法(Apppearance based approach)で、顔画像全体の濃淡パターンを用いて認識を行うものである(図4(c))。本章では、見え方ベースの方法を、それぞれの数学的な表現の基本となる技術ごとに分類し、どのように使われているかをまとめる。

### 3.1 PCA

主成分分析を用いて顔画像の次元削減を行い、低次元の部分空間によって、顔を表現することをねらった論文として、[171][71]がある。[71]で紹介されている通り、パターン認識に主成分分析を用いた次元圧縮



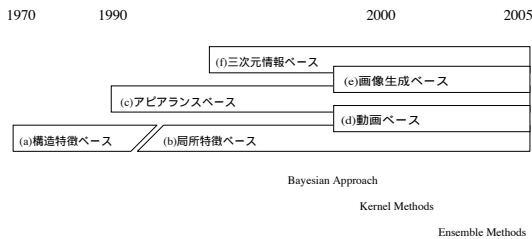


図 4: 顔認識研究の変遷

を適用したのは、ハワイ大学の渡邊慧の SELFIC 法 [189] である。Kirby らの後、その部分空間を張る固有ベクトルに対して、Eigenfaces という名前をつけた Turk らの論文 [181] が有名になり、現在の顔認識研究が盛んになるきっかけを得た。

### 3.1.1 Eigenfaces

Eigenfaces[181] について簡単に説明する。ある一定の大きさに切り取られた  $w \times h$  画素の画像を、 $w \times h$  個の各画素の値が一次元ベクトルの各要素となるようにしたベクトルを  $x_i$  とする。すべてのデータ  $x_i (1 \leq i \leq N)$  の平均ベクトル  $\mu$  を求め、以下のようにデータベクトルの分散共分散行列  $S$  を求め、その Karhunen-Loève 展開を求める。

$$S = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T$$

$$S = \Phi \Lambda \Phi^T$$

ここで、 $\Phi$  の各行ベクトル  $\phi_i$  が固有空間の基底ベクトルとなる。各  $\Lambda$  の各固有値  $\lambda_i$  の大きな順に並べ変えたとき、ある定数 ( $M$ ) で打ち切った  $M (< N)$  個のベクトルを考える。各画像は、この  $M$  個の基底ベクトルで張られる空間の 1 点として表現され、この空間における各点 (係数行列ベクトル) 同士の距離を用いて識別が行われる。

$$\hat{x}_i = \Phi' x_i = \sum_{i=1}^m a_i \phi_i = a_1 \phi_1 + a_2 \phi_2 \dots a_m \phi_m$$

例えば、プロトタイプとなる参照画像のあらゆる係数行列ベクトルと入力画像ベクトルとのユークリッド距離を求め、もっとも近いプロトタイプの人物と判定する。

初期の文献では、任意の大きさに区切られた画像に対して行われたが、より精度の高い認識を行うために、背景や髪を取り除くように正規化される前処理が行われる。そのためには顔の各部位の位置を検出しておき、それらの位置を一定に揃えるように画像生成が行われる。一例として、[22] では、顔パターンの形状とテクスチャを分離して、それぞれを線形結合モデルで表現し、主成分分析により解析を行っている。Shape-Free と呼ばれる表現にすることで、厳密な対応点を必要としない表現法の構築を目指している。

さらに、Eigenfaces は、それぞれの顔向きごとの画像に対する固有空間を用意したり、顔画像を目、鼻、口といった部品ごとの固有空間で認識を行う方法 [130] が存在する。

### 3.1.2 ベイズ推定の枠組みを用いた拡張

入力画像の固有空間との距離を測る場合、DIFS(Distance In Feature Space)、DFFS(Distance From Feature Space) という二つの距離を主成分空間とその直交補空間の部分空間を用いて定義し、自己内の変動と他人間の変動を考慮した認識が行われた [119]。この際行われた確率的な定式化を拡張し、2 枚の画像の差分画像に対するクラス分け問題をクラス内分散、クラス間分散を考慮した認識法 [118] を提案した。さらに、差分ベクトルに対しての個人内変動、個人間変動の分布をそれぞれ混合ガウシアンモデル (Gaussian Mixture Model: GMM) などで個人の分布をもつ形に発展させ、ベイズ推定の枠組みを導入して、認識を行う方法に拡張されている [117]。

### 3.1.3 Fourier 解析等を利用したもの

赤松らは [2] フーリエスペクトルを求めた後、PCA による次元圧縮を用いた顔表現による認識により、正規化に伴う小さな平行移動の影響を受けないことを目指した。また、離散コサイン変換 (DCT) による [47] や Walsh-Hadamard 変換を利用した [148] なども存在する。

一方、EigenPhases(Corefaces)[160][161] は、フーリエ変換の位相情報を利用した固有空間表現を用いて、認識を行う。正面顔で照明条件を変化させたものだけのテスト画像において、高い認識結果を得ている。

### 3.1.4 大きな変動に対する固有空間の改良

Nagao[121] は、個人内変動、個人間変動の分布に基づいた弱直交化を行った固有空間を用いて、画像の取得過程が大きく異なるような場合に対する認識を行っている。また、さらなる改良として、混合分布モデルで記述された顔の分布に対する特徴抽出法を [120] で提案している。

### 3.1.5 2D-PCA

2次元主成分分析 (2D-PCA) と呼ぶ方法による顔認識の方法がある [205]。2D-PCA は、従来の一次元ベクトルから共分散行列を求めるのではなく、2次元行列に基づいており、原画像から直接共分散行列を求めることができるとしている。従来の PCA に比べて3つのデータベースでの比較において、高速で比較的良好な結果が得られている [206]。

### 3.1.6 TensorFaces

照明、表情、顔向きなどのさまざまな変動を統一的に取り扱う試みとして TensorFaces[183] がある。多重線形代数の枠組みで、さまざまな条件で変化させた画像を処理し、テンソル形式で表現しておく。顔の集合全体は、各変動成分の積の形で表され、入力画像に対しては、各部分的に各変動を固定した部分テンソルから得られる行列に射影計算を行って得られる係数ベクトル同士のユークリッド距離を用いて、認識が行われる。

## 3.2 ICA

ICA(Independent Component Analysis) 独立成分分析は、データの独立成分に着目し、その基底を求め、Eigenfaces と同様の表現を行う。データに対しての PCA で求まる主成分は直交座標系であるのに対して、ICA では斜交座標系となっている。ICA に対する高速な計算方法 [57] が開発されたことにより、様々な応用がなされた。ICA を用いた顔画像の表現法は、Bartlett[7] に導入され、顔認識も初期の ICA のアプリケーションとして行われている [8]。近年では、PCA の代用として用いられることが多く、基本的な PCA との組み合わせ、性能比較を行った文献 [28] な

どがある。また、上述した Tensorfaces についても、[182] により、ICA を用いた表現に拡張されている。

## 3.3 LFA

PCA による基底を改良し、さらにコンパクトに表現を行う試みとしては、もっとも顔認識製品として有名といってもよい FaceIt[55] に採用されている LFA (Local Feature Analysis) がある。

先の PCA による分散共分散行列の分解に対して、次の白色化された行列  $K$  を求める。

$$S = \Phi \Lambda \Phi^T$$

$$K = \Phi V \Phi^T$$

$$V = \Lambda^{-\frac{1}{2}} = \text{diag}\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}\right)$$

この  $K$  で張られる空間に射影をしたときに、PCA と同様に再構成エラーを小さくすることを目的とする。[129] で提案された方法では、次元圧縮を目的として、その再構成エラーを最適にするように重回帰分析を用いて、固有ベクトルを選択する。PCA と比較すると、平均で約 1/3 程度コンパクトになるとされている。しかし、実用上では PCA との組み合わせによる実現方法が多い。

## 3.4 LDA

LDA (Linear Discriminant Analysis) は、Fisher の判別基準に従い、クラス間分散  $S_b$  を最大にし、クラス内分散  $S_w$  を最小にする軸を見つける。

$$W_L = \arg \max_w \frac{W^T S_b W}{W^T S_w W}$$

$x_j$  は、それぞれのサンプル、 $C$  はクラス数、 $N_k$  クラス  $k$  に属するサンプル数、 $\mu_{all}$  は全サンプルの平均、 $\mu_k$  はクラス  $k$  に属するサンプルの平均である。

$$S_b = \sum_{k=1}^C N_k (\mu_k - \mu_{all})(\mu_k - \mu_{all})^T$$

$$S_w = \sum_{k=1}^C \sum_{x_j \in C_k} (x_j - \mu_k)(x_j - \mu_k)^T$$

[177] では、判別分析と線形射影を用いてトレーニング・セットから判別に適した自動特徴選択する方

法について述べられており、顔画像に適用して、木構造による表現を用いて認識を行ったものがある [178].

また、PCA ベースの Eigenfaces に対応した FisherFaces[11] では、人物ごとのクラスのサンプルに分け、上述の線形判別分析を行った後で、その軸を用いた画像表現を行う。FisherFaces もしくは Subspace LDA[220][219] では、いったん PCA を施して次元削減を行い、削減された次元で判別分析を適用する。Eigenfaces との比較において、良い性能が得られている。[61] では、LDA ベースの認識法に関して距離関数を変えた場合の評価を行っている。[101] では、層別逆回帰法を用いて、LDA の軸の数を削減しても性能が落ちない結果が得られることを示している。

### 3.5 HMM

音声認識、ジェスチャー認識など時系列データの認識で利用されている隠れマルコフモデル (Hidden Markov Model: HMM) を顔認識に適用した例 [157][156] がある。短冊上に区切られた濃淡ベクトルの遷移確率を求め、その確率モデルが個人ごとに異なることを利用している。Intel のコンピュータビジョンライブラリである OpenCV には、HMM ベースの顔認識のソースコードが公開されている。最近においても、いくつかの改良研究 [128][104] がみられる。

### 3.6 SVM

様々な分野で応用されている識別器である Support Vector Machine(SVM) を用いた顔認識手法がある。SVM は 2 クラス分類の問題として導入されたため、マルチクラスに対応するために、(1) 当人以上をすべて他人とした別クラスとした識別の統合 [136]、(2) それぞれの 2 人ずつの認識を行う識別器を用いた結果の統合を行うもの [44] が考えられた。一方、[131] では、2 つの画像の差分ベクトルに対して、クラス内の変動を記述するクラスとクラス間の変動を記述したクラスの 2 つのクラス分類問題としてとらえる手法であり、顔同定 (1:N 認識) 処理ならびに顔照合 (1:1 認識) 処理を同じ評価関数を用いて認識できることが特徴である。この方法に対して、Subspace LDA を特徴抽出に用いたもの [65]、ICA を特徴抽出に用いたもの [26] がある。

### 3.7 部分空間法 (相関法, CLAFIC 法)

顔全体の画像パターンをモザイク化し、その画像パターン同士の違いを内積 (角度) で測る認識法として、[74] がある。また、顔を部分画像にわけ、目鼻口の領域の正規化相関値の組み合わせによる認識法 [27] により、ドアの鍵制御を行う試作システムが作られた。[169] では、顔の向きによらずに高速に精度良く識別することを目指して、モザイク特徴を用いたアスペクト法における顔向きの登録間隔とパターンの次元数について最適な辞書生成法について議論している。

また、登録画像を複数にした場合、その各カテゴリごとに登録画像系列の部分空間を計算し、テストデータと部分空間の距離 (角度) を用いて認識を行う方法として CLAFIC 法がある [190]。これらの方法は「部分空間法」とも呼ばれ、Eigenfaces と区別が必要である。類似した方法には、複合類似度法 [58] がある。従来、文字認識等で利用されてきたテクニックであるが、顔認識に適用した例としては、[6] がある。また CLAFIC 法では、各部分空間を構成する際に、分散共分散行列ではなく、相関行列を用いている。これに対して、Eigenfaces と同様に全データの平均をそれぞれのデータから引いた上で、カテゴリごとの相関行列を用いて、CLAFIC 法を適用した [5] などがある。Eigenfaces がすべてのカテゴリのデータから部分空間を計算するのに対し、各カテゴリごとに部分空間を構成するという点も異なる。

### 3.8 カーネル関数を用いた非線形化手法

様々なポーズの顔の分布は非線形になることから、各方式を非線形化する試みがある。カーネルトリックを使ったものとして、以下のものがある。

従来の Eigenfaces で行う主成分分析に非線形カーネル主成分分析 (KPCA) を行って軸を求め、認識を行っている [209]。カーネル関数には多項式カーネルを利用している。[208] では、非線形カーネル線形判別分析 (KLDA) を用いて、Fisherfaces[10] と類似したタイトルをつけ Eigenfaces, Fisherfaces の非線形化を行った。[222] では、Moghaddam らが行った Eigenfaces のベイズ推定による拡張をそのまま非線形化した。しかし、PCA から KPCA に変えた場合、一枚の画像同士の照合に関しては性能向上はそれほ

ど大きくない。これは、評価を行っている利用データベースにも依存していると考えられ、複数の視点から撮影された画像列に対しては、非線形化の効果が見られる。[46]では、KPCA, KLDAで特徴抽出した後、NNとSVMを用いて認識を行っており、姿勢変動を伴う場合にも認識がうまくいくことを示している。また、[203]は、KLDAがカーネルPCAと線形のLDAを組み合わせたものと等価であることを述べ、その効果について議論している。

### 3.9 アンサンブル学習を用いた顔認識

複数の弱識別器の組み合わせによって高い認識率を得ようとするアンサンブル学習を顔認識に適用したものがあ。[45]では、ベイズ判別を識別器としてAdaBoostを用いて、2つのカテゴリの判別器を多数組み合わせることによって、認識を行う。同様にAdaBoostを用いたもので、[116]では、顔検出で有名なViola-Jones検出器で利用されているものと同種の特徴量を用いて、個人の識別を行う。高速に検索が可能であることを特徴としている。Subspace LDAをベースとしたBaggingによる学習を行った[105]では、4つのデータベースにおける認識性能の向上を確認した。さらに[188]では、Random Subspace[51]なども導入し、複数の識別器によるアンサンブルの結果、高い認識率を得ている。

## 4 動画を用いた認識

これまでの方式は、主に静止画同士の照合を扱ってきた。これに対して、入力を動画(複数画像)とする認識法が開発されている(図4(d))。初期のものとしては、RBFニューラルネットワークを用いて画像列を用いて学習、認識を行う手法[53]や、色情報を用いて切り出された顔領域に対して、PCAによる次元圧縮とGMMを用いて動画から事前分布を求め、ベイズ推定の枠組みで事後確率を推定し、識別を行う方法[114]などがある。

### 4.1 相互部分空間法に基づく認識法

従来法であるCLAFIC法による顔認識の拡張として、山口ら[200]は、辞書となる画像系列の部分空間に

加え、入力画像系列に対する部分空間も求め、2つの部分空間の間の角度を測る相互部分空間法(Mutual Subspace Method)[109]による認識法を提案した。従来一枚の画像だけからの認識と比較して、顔の向きや表情の変化に対しても強い認識が可能となる。また、比較的小さな計算量に抑えてシステムを実装できる[199]。この方法では、一枚ずつの認識を複数枚に対してそれぞれの行い、結果を統合するという方法ではなく、画像系列から得られる統計的な記述を用いて認識を行う。

福井ら[36]は、照明条件の違いなど環境変動に左右されずに、人物間の違いをより反映させるような特徴抽出を行う、制約相互部分空間法を提案した。この方法では、それぞれの各個人の様々な変動を含んだ辞書部分空間を用意し、それらの部分空間の差分に着目した差分部分空間を計算する。そして、各差分部分空間の共通成分の空間が、個人性を抽出可能な空間として定義でき、これを制約部分空間と呼ぶ。この制約部分空間に、入力部分空間と辞書部分空間のそれぞれを射影することにより、変動に影響を受けにくい成分のみで張られる空間における部分空間同士の角度を用いて、認識を行う。この方法により、高い精度での認識が可能となった。[37]では、この差分空間を2個以上の場合に一般化し、各部分空間のなす射影行列から簡便に制約部分空間を計算する方法を示し、[77]によって入退室システムにおける評価がなされている。さらに、複数の制約部分空間をアンサンブル学習によって求め、同時に異なった複数の特徴抽出を行う、多重制約相互部分空間法への拡張がある[125]。

相互部分空間法に非線形カーネルPCAを用いた例として、坂野らの[154]があげられる。この手法では、大きくポーズの異なる系列を持ったもの同士の認識を行い、その効果の大きさが示されている。なお、[194]においても、分布のもつ非線形性を考慮し、同様のアプローチが取られている。

### 4.2 多様体による表現

同様の統計的モデルを用いた画像系列の認識法として、複数の画像系列をガウシアンモデルで記述し、モデル同士のマッチング測度にKL-divergenceを導入し、画像系列がもつ分布の類似性を測ることにより、識別を行っている[166]。さらにカーネルPCAを

用いて非線形に対応し、KL-divergence の双対性を考慮した Resistor Average Distance によって行う [4] などがある。[90] では、画像の系列の多様体を求めることを目的として、動画像系列を複数の部分空間で記述することを行っている。多様体間の近さは入力系列の条件つき確率を求めることで行われる。また、一人のカテゴリに内在する複数の多様体間の遷移確率を時間的な共起性に基づいて求めておくことにより多様体同士の連続性についてもモデル化している。

### 4.3 トラッキングベースの手法

異なるアプローチとしては、[31] は動画像系列中で、Active Appearance Model(AAM)(6章に説明)を用いて、個人の顔への適応を行いながら、トラッキングを行う方法を示し、顔向きや表情の変化する動画像系列での性能の高さを示している。また、[98] では、AAMの基本となったPDM[20]とカルマンフィルタを用いてトラッキングをした顔領域が、顔の向き2方向とパターンの軸を加えた3次元の空間中の面を各個人ごとに設定し、入力された系列の軌跡が各個人の面にそった近い軌跡を描く面を求めるという方法があり、時系列の順序情報も加味されている。[221]らは、ビデオの中を移動する顔をトラッキングすることに着目し、CONDENSATION[59]を用いて、顔領域を追跡する。それぞれの人物のモデルとの追跡の度合いによって識別を行う。[1]においても、自己回帰移動平均モデル(ARMAモデル)によるトラッキングを行い、そのARMAモデル同士の距離(角度)を測るという方法で認識が行われている。

## 5 Analysis by Synthesis による顔認識

計測により得られるデータと同種のデータを生成モデルから合成して求め、計測データと比較することによって解析を行う、生成に基づく解析法(Analysis by Synthesis)と呼ばれる手法がある(図4(e))。

顔認識においても、3次元データと組み合わせてComputer Graphicsなどの画像合成技術を利用したり(図4(f))、線形結合モデルにより顔画像を生成するなどし、入力されるデータと比較することによって認識する。主として、顔の向きの変化や、照明条件の

変化に対応するため、ある条件を仮定した場合のモデル生成を対象とした研究があり、これらに関連する文献をまとめる。

### 5.1 照明変化に対応する生成モデル

Shashua[167]は、点光源と完全拡散反射面を仮定した場合、光源方向の異なる3枚の画像の線形結合により任意光源方向の画像を表現できることを示した。点光源下の(一次)反射成分は、拡散反射成分、鏡面反射成分、アタッチドシャドウ(attached shadow)、キャストシャドウ(cast shadow)の4つに分類される。

Belhumeurらの[13]では、物体が任意照明で取りうる画像集合は、画像空間における原点を頂点とする凸錐をなす、照明錐(Illumination Cone)モデルについて議論した。このモデルでは、拡散反射成分とattached shadowの存在する画像は、境界画像と呼ばれる複数枚の画像の凸結合で表現される。

拡散反射成分とattached shadowを、少数の画像を用いて効率よく表現するために、[48]のように、主成分分析を用いて基底画像を近似的に表現すること手法がよく用いられる。一方、Basriら[9]とRamamoorthiら[142][141]は、球面調和関数を用い、周波数空間での解析から、4枚から9枚の基底画像の線形結合で、照明錐を近似できることを示した。

さらに異なる照明下で得られた画像を用いて、モデルの獲得を行う方法には、様々な方法がある。[216][38]では、欠損を考慮したSVDを用いて、可積分条件による拘束を組み合わせることで、形状復元を行い、基底画像を求め、任意の方向の画像を生成する。このように顔形状を復元[12]し、照明錐モデルをcast shadowの存在する場合に拡張する研究[38]も行なわれている。中島らは、異なる顔方向を1つのカメラで撮影した画像列に基づいて、Geotensity拘束により基底画像を推定する方法を提案した[122]。岡部らは、鏡面反射成分やキャストシャドウの部分を外れ値としてRANSACを利用して、基底画像の推定を行う方法が認識時にも有効であることを提案している[126]。また、山元ら[201]は、1枚の画像から任意の照明条件の画像を仮想的部分空間を用いて生成する仮想部分空間法を提案している。坂上ら[155]は、画像の輝度の総和を一定とする正規化画像空間内に構成される固有空間に対し、影領域やノイズ部分を除いた限定領

域のみで射影を行うことで画像を再構成し、認識を行っている。

これらの生成モデルを用いた認識では、再構成される画像  $\hat{I}_x$  について

$$\hat{I}_x = \sum_{i=1}^m a_i \phi_i$$

における係数の推定を、従来の線形部分空間に対する射影計算では、正確な画像再構成が行われないため、最小二乗法の枠組みで最適な結合係数を推定していることが特徴となっている。

一方、照明条件の変化にロバストにするために、[143]では、顔表面の反射率(アルベド)を推定する方法が提案され、顔認識や顔画像の合成に用いられている。この方法は、線形結合モデルで表された画像で元の画像の「商」を得るために、Quotient-Image と名づけられている [168]。しかしながら、この Quotient-Image を求めるには3枚の基底画像が必要となる。そこで、従来、画質改善のテクニックとして用いられていた Retinex 理論 [83] を利用し、一枚の画像から同様の画像を得る、Self-Quotient-Image が提案された [186]。さらに [187] では、球面調和関数との関連が議論されている。

## 5.2 向き変化に対応する生成モデル

Beymer は、2次元画像の見え方の変化を事例から学習し、与えられた顔画像に対して任意視点からみた画像に変換して認識を行う方法を提案した [14]。

石山らの測地照明基底法では、特定の人物の様々な照明変化を行った画像を円筒座標系に変換して主成分分析を行っておき、姿勢に依存しない照明変化の基底画像を求めておく。そして、姿勢に応じた画像を各個人の3次元モデルを用いてレンダリングし、入力された2次元の画像と比較を行う [60]。

Gross らは、Light-Fields モデルを用いた認識法を提案している。Light-Fields モデルは、光が物体にどのように反射するかということすべての方向からみた場合の見え方を記述しておく方法で、Computer Graphics のレンダリングのテクニックとして採用されている。このモデルは、さまざまな角度から撮影された多数の画像を用いて作成される。Gross らは、さらにこの Light-Fields モデルの固有表現である、Eigen-Light-Field を求め、認識に利用している [42]。

Blanz らは、多数の人物の3次元形状とテクスチャを収集し主成分分析し、形状とテクスチャの正規直交基底による 3D Morphable Model を構築し、2次元の画像から任意の向き、個人を推定する方法を提案した [15]。計算時間の問題があるものの、高い認識性能を示している。

Lee ら [89] は、複数の方向から撮影された画像のシルエット画像を求め、3次元モデルとのマッチングを組み合わせ認識に最適な姿勢を求める方法を提案している。

## 6 顔認識—モデルベース手法

イメージベース手法は、その性能が顔領域の切り出し精度に大きく依存する。理想的には、顔器官や特徴点の位置が画像間で正規化されていることが望まれる。そのためアピアランスベース手法であっても、実際には顔器官や特徴点の検出精度が重要となる [211]。また、顔器官や特徴点の位置には個人差があり、この情報を個人識別や表情認識に用いる手法や、その周辺のアピアランスを用いる手法が提案されている。このように顔器官や特徴点の位置を考慮した手法は、顔の構造モデルを利用することから、本稿ではモデルベース手法と呼ぶことにする。一般的には、表情などの顔の変形や照明の変化にロバストという長所を持つように設計されるが、精度良く特徴点を検出するために計算コストが膨大になる短所を合わせ持つ。モデルベース手法は、大きく分けると 1) 構造を利用せず局所特徴量のみで認識するものと、2) 2次元の構造モデルを持つもの、3) 3次元の構造モデルを持つものに分かれる。3次元の構造モデルを持つと照明の影響などを押さえることが出来るという利点があるが、パラメータが多くなり探索空間が広くなるという欠点がある。2次元の構造モデルを利用した手法として、変形パラメータを持ったテンプレート Deformable template [215, 84, 19] を利用したもの、顔をリンクで表現したグラフマッチング法 [82, 192, 137]、2次元構造の接続関係を確率で表現した確率的手法 [113, 56, 213] とに分類することが出来る。

本稿では、モデルベース手法のうちで、局所特徴量のみで判別する局所特徴量照合法、Deformable template から発展した Active Appearance Model、顔

をリンクで表現するグラフマッチング法，特徴の接続関係を確率で表現した確率的手法，最後にそれらに用いられた識別手法について紹介する．

## 6.1 局所特徴量照合法

顔には，2つの目，1つの鼻，1つの口があり，似たような幾何配置を取っている．そこでこれらを個別に抽出して，その形状を比べることにより認識を行うことが考えられた．Brunelliらは，目，鼻，口の幅，高さ，位置など35個の形状パラメータを取り出し，マハラノビス距離により人物を判定した[16]．また，Coxらは顔の各特徴が出現する確率を定義して，全ての顔特徴の同時確率を人物間の距離と定義する mixture-distance[21] を利用した[21]．

また，局所的な特徴量として，Kotaniらは $4 \times 4$ の代表テンプレート (codeword) を作成して，入力画像をコード化しそのコード分布を顔の認識に利用した[75]．コード分布はヒストグラムで近似して求めている．Kuritaらは局所特徴量として，高次局所自己相関特徴を利用した[80]．高次局所自己相関特徴は平行移動に対してロバストで，判別分析法と組み合わせで高い識別率を達成している．さらに大きさの変化に対応するために Log-Polar 画像を用いた拡張[79]も試みられている．また，本郷らは[52]は，エッジの勾配を4方向に分解し，ガウシアンフィルタを施した4方向面特徴と判別分析を用いて人物識別を行った．また，Goudailらは顔のスケール変化に対応するため画像ピラミッドから高次局所自己相関特徴量を取り出している[40]．また，ガポール特徴量を利用して出力の大きい特徴点 (salient feature points) だけを選択して顔認識を行う方法もある[70]．

## 6.2 Active Shape Model / Active Appearance Model

Active Shape Model[20, 19] は，Active Contour Model[69] を拡張したものである．Active Contour Model は高次元の変形パラメータをもち，エネルギー最小状態のパラメータを求めるのに非常に時間がかかるという欠点がある．そこで，変形パラメータの次元を落とす方法として，Cootesらは，学習データを多数用意して PCA により次元圧縮を行った．そう

することにより平均パラメータ (平均顔) と，いくつかの基底ベクトルの線形和により形状の変化を近似表現できることになり，高速に探索が可能となる．彼らはこの手法を Active Shape Model (ASM) と呼んだ[19]．‘Active Appearance Model (AAM)[84] は Active Shape Model にテクスチャ情報を付加したものである．顔の形状は，ASM で表現するので，制御点の分布で表現される．これは顔器官のエッジ上に離散的に制御点を配置した形状モデルである．顔画像への形状モデルの照合は，Active Shape Model 探索[19]によって行う．顔画像から抽出する特徴量は，形状パラメータ，形状に依存しない濃淡画素値パラメータ，局所濃淡画素値パラメータの3つである．表情変化の影響を抑えるため，画像に整合された ASM を用いて，平均顔に整合する画像を変形する．この変形には thin plate スプラインに基づく手法を用いる．この操作により，形状に依存しない濃淡画素値パラメータを得ることが出来る．局所濃淡画素値は，制御点 (顔特徴点) 上のエッジに垂直な線上の濃淡値である．この局所特徴量を使うことにより，オクルージョンなどの影響を押さえ安定な判定が可能となる[85]．個人識別は個人モデルとテスト画像の特徴量間のマハラノビス距離を用いて行う．Lanitisらは，AAMの応用として，顔のトラッキング，3次元形状復元，性別認識，表情認識も行っている．

AAMでは形状とアピアランスを独立に学習していたが，これらは互いに関連しているため，Edwardらは形状パラメータと形状に依存しない濃淡画素値パラメータを1つのベクトルに連結して PCA をかけるという手法に改良している[30]．また，AAMは固有ベクトルの線形和で表されるモデルであったが，顔の向き変化など極端な変化には対応できない．ところで，多層パーセプトロンの中層パーセプトロン数を入力層，出力層のパーセプトロン数より少なくすれば情報圧縮と同様の効果が得られる．そこで，そのような砂時計型の多層パーセプトロン (MLP, multi layer perceptron) を導入することで，非線形な情報圧縮が行えるようにした．Edwardらはまた，アピアランスの変化に安定した個人識別を達成するために，AAMを Kalman Filter を利用した動画像追跡手法へと拡張している[31]．

### 6.3 グラフマッチング法

グラフマッチング法は、顔の目や口の端点を特徴点として定義し、そこにノードを配置することで顔をグラフによって表現する。グラフマッチング法の代表として Wiskott らが提案した Elastic Bunch Graph Matching (EBGM) [192, 193] が挙げられる。EBGM が用いるグラフは、特徴点周辺から抽出されるガボール特徴量とノード間距離を特徴量として持つ。ガボール特徴量は、画像とガボールフィルタの畳み込み演算を行うガボールウェーブレット変換によって抽出される。ガボールフィルタは人間の視覚特性を模倣し、いくつかの大きさ(周波数)と方向のフィルタによって画像を多重解像度で解析する。また、均一な照明変化にロバストな特徴量を抽出できる。

EBGM はまず、平均モデルグラフを用いたラスラスキャンによって画像中の顔の位置をおおまかに特定する。平均モデルグラフは学習画像の特徴量の平均を求めることで生成する。そして、特定した顔の位置周辺で特徴点の検出をバンチグラフを利用して行う。バンチグラフは表情変化などアピアランスが異なる学習画像から抽出した様々なガボール特徴量を各ノードが持つグラフである。テスト画像に適したガボール特徴量をバンチグラフから選択し、それを参照モデルとして特徴点を検出する。これにより、様々なアピアランスに対応できる。また、ガボール特徴量の位相成分を利用して特徴点の位置誤差を推定することで精度良く特徴点を検出することができる。個人識別は、抽出したガボール特徴量と個人のモデルグラフとの相関を求めることで行う。EBGM の個人識別精度が他手法より高いことが検証されている [132]、オムロン製 FaceKey などの実用システムにも応用されている。Wiskott はまた、EBGM の照合プロセスをもとに Phantom face と呼ばれる顔画像を生成し、顔の属性の分析を行っている [191]。グラフの代わりに顔画像に多量のサンプリング点を配置し、EBGM と同様の照合プロセスと coarse-to-fine 戦略によってアピアランスの異なる 2 枚の顔画像の詳細な対応をとる手法も提案されている [197]。

グラフマッチングに基づく顔認識は、顔の位置、大きさ、向きなどの推定の精度と計算コストとにトレードオフの関係が存在する。krüger らは大きな向きの変化を持つ顔の位置を効率良く推定するために、各ノードの重要度を分析した [78]。それによれば、頭頂

部と目を表すノードは重要ではない。また、輪郭と目を表すノードが少ないモデルで向き以外の変化に対応することができ、他のノードとの相関も低いという分析結果を得ている。同様な分析を Kalocsai らもしている [66]。ガボール特徴量は各方向とスケールをもち高次元の特徴量となっており、計算コストも高い。そこで、Kalocsai らは、ガボール特徴量の各方向とスケールの重要度を特徴量の分散分析から推定し、次元を圧縮する方法を試みた。それによれば、48 次元の特徴量で、6% 程度の認識率の低下で済むという結果を得ている。また、Liu らは、PCA と ICA によりガボール特徴量の圧縮を行った [103]。Pramadiahanto らは、平均モデルグラフのみで効率良く特徴点を検出するためにシミュレーテッドアニリングを導入した [137]。EBGM の欠点が平均モデルグラフを用いたラスラスキャンによる顔位置の特定であると指摘し、顔の位置と大きさの推定と個人識別を並列的に行うことで効率化を目指した研究も報告されている [50]。同様に、Kotropoulos らは楕円フィッティングにより位置と大きさを正規化し、顔の対称性を利用して顔の左右の領域の明るさを補正し、個人識別に EBGM の原形である Dynamic Link Architecture (DLA) [82] を適用した [76]。DLA と EBGM の違いは、グラフの形状とモデルグラフが保有する特徴量の数である。DLA では矩形格子状のグラフを用い、そのグラフはバンチグラフではなく単一のモデルの特徴量から構成される。

### 6.4 確率的手法

顔認識手法というと Eigenface や EBGM が目立つが、確率的なパターン認識を応用したのも当然のことながら提案されている。

Matsui らは、ベイズ推定により動画の各フレームでの顔特徴点の事後確率密度と、モデルに対する事後確率密度を MCMC 法により求める手法を提案した [113]。顔の特徴量にはガボールウェーブレット特徴量を利用している。この手法は動的な表情の変化に対応している。他のベイズ推定を応用した手法としては、Belief Propagation (BP) を用いたものが Huang によって提案されている [56]。この手法は、顔画像をパッチに分割し、パッチとパッチに対応するモデルの関係をマルコフランダム場によって表現する。テ



スト画像の個人識別は、各パッチのモデルを BP を用いた最大事後確率推定により求め、求められたモデルの投票処理によって行う。実験では、様々な変化を持つ顔画像に対して PCA や LDA に基づく手法より個人識別精度が幾分向上したことを示した。また、Koh らはニューラルネットワークを用いた手法を提案した [72]。ニューラルネットワークへの入力、顔の鼻を中心に同心円状にグリッドを配置し、グリッド上のサンプリング点の周辺の平均輝度とした。照明や背景の変化がある自然なシーンで顔の大きさと向きの変化に精度良く対応した。音声認識やジェスチャ認識で有効とされる隠れマルコフモデル (HMM) を用いた手法も提案されている。Nefian らは、DCT 係数を特徴量として、顔の構造マッチングを画像の上から下へ Left-to-Right 型 HMM で行った [123, 124]。また、顔の構造マッチングを 2 次元 HMM により求める手法もある。Eickeler らは、DCT 係数を特徴量として顔の構造マッチングに 2 次元 HMM (実際には疑似 2 次元 HMM) を利用した [32]。Yoon らは、テスト画像の各個人モデルらしさを表す確率を HMM によって求め、それらの確率をニューラルネットワークに入力することで個人識別を行う手法を提案した [213]。特徴量は顔器官の大きさや位置関係が用いられた。無表情の正面顔に対して非常に高い個人識別精度を達成できることが示されている。

## 6.5 顔の識別手法

顔器官や特徴点周辺のテクスチャに部分空間法を適用する手法が数多く提案されている。アピアランスベースの手法への応用により成果を挙げている PCA は、モデルベースの手法へも次元削減およびノイズ除去手法として適用されている。Yilmaz らはエッジ画像にガウシアンフィルタをかけたものに PCA を適用する Eigenhill という手法を提案した [212]。この手法の狙いは照明変化へのロバスト性である。グラフマッチング法である DLA と線形判別分析 (LDA) を組み合わせた手法も提案されている [88]。DLA の欠点である低計算効率を、LDA を用いた特徴量空間の圧縮によって改良している。しかし、従来の DLA より個人識別精度が大幅に低下し、計算効率とのトレードオフを解決するには至らないという実験結果が得られている。LDA を用いた手法としては、画像

を矩形領域に分割し、それぞれの領域で LDA 係数を求めるものがある。Zhao らは、3 パターンの矩形分割を定義し、それぞれのパターンでの個人モデルとの類似度を融合することで、画像全体に LDA を適用する手法より個人識別精度を向上させた [217]。近年、盛んに研究されている SVM を用いた手法も提案されている。Heisele らは、顔検出、顔器官検出、個人識別の全てを SVM で行う手法を提案した [49]。まず、顔の候補領域に各顔器官の検出用 SVM を適用し、各器官の候補領域を検出する。そして、各領域の濃淡値を統合して 1 つのベクトルを形成し、それに顔か背景かを判別する SVM を適用して、候補領域の検証も行う。個人識別には他クラス判別用に拡張した SVM を用いる。この手法がアピアランスベースの SVM より個人識別精度が高いことが示されている。Smeraldi らは自ら提案した retinotopic sampling によって求まる目領域を中心としたガボール特徴量に SVM を適用することで顔検出システムを個人識別システムへと拡張した [173]。また、DLA の高い認識能力を SVM によってさらに向上させた研究もある [179]。

## 7 研究に利用できる公開顔データベース

現在、様々な機関から顔データベースが利用できるようになっている。ここでは、インターネット等から入手できる情報を元に公開顔データベースについて紹介する。データベースの利用条件については、正確を期すためにここでは記述しない。顔データベースは、個人情報を含むのでそれぞれのデータベースの規定に従った適法な利用が必要である。また、顔画像データベースの情報については Face Detection Home Page (<http://home.t-online.de/home/Robert.Frischholz/face.htm>) などで入手できる。

## 8 おわりに

本論文では、画像処理による顔情報処理に関連した研究について、1) 顔検出法、2) イメージベースの

<sup>1)</sup> 内の数字は、女性数を表す

名称	画像	サイズ	人数 <sup>1</sup>	画像/人	撮影条件
AR Face Database[112]	カラー	768x576	126(56)	26	表情変化, 照明変化, アクセサリ
BioID Face Database[62]	濃淡	384x286	23	66	正面
CVL Face Database[174]	カラー	640x480	114(6)	7	向き変化, 表情変化
FERET Database[134]	濃淡 (カラー)	256x384	1209	2~	正面, 向き変化
JAFFE Database[106]	濃淡	256x256	10(10)	7	表情変化
Olivetti-ATT-ORL[158]	濃淡	92x112	40	10	正面
PIE Database[170]	カラー	640x486	68	多数	向き変化, 照明変化, 表情変化
The UMIST Face Database[39]	濃淡	220x220	20	19 ~ 36	向き変化
The Yale Face Database [10]	濃淡	320x243	15	11	アクセサリ, 表情変化, 照明変化
The Yale Face Database B[38]	濃淡	640x480	10	576	向き変化 (9)x 照明変化 (64)

表 1: 無料公開顔データベース

名称	画像	サイズ	人数	画像/人	撮影条件
NIST Mugshot Identification Database (MID)	濃淡	不特定	1573(78)	2	正面, 横顔
The University of Oulu Physics-Based Face Database[111]	カラー	428x569	125	16	正面, 照明変化
XM2VTSDB[115]	カラー	576x720	295	8	正面, VRML
BANCA	カラー	720x576	208	12	正面
ソフトピアジャパン顔データベース	カラー	640x480	300	Set	正面, 向き, 年齢変化

表 2: 有料公開顔データベース

名称	URL
AT&T Laboratories Cambridge face datababase (ORL)	<a href="http://www.uk.research.att.com/facedatabase.html">http://www.uk.research.att.com/facedatabase.html</a>
AR Face Database	<a href="http://rv11.ecn.purdue.edu/~alex/aleix_face_DB.html">http://rv11.ecn.purdue.edu/~alex/aleix_face_DB.html</a>
BANCA	<a href="http://www.ee.surrey.ac.uk/banca">http://www.ee.surrey.ac.uk/banca</a>
BioID	<a href="http://www.humanscan.de/support/downloads/facedb.php">http://www.humanscan.de/support/downloads/facedb.php</a>
CVL Face Database	<a href="http://www.lrv.fri.uni-lj.si/facedb.html">http://www.lrv.fri.uni-lj.si/facedb.html</a>
FERET	<a href="http://www.itl.nist.gov/iad/humanid/feret/">http://www.itl.nist.gov/iad/humanid/feret/</a>
JAFEE Database	<a href="http://www.mis.atr.co.jp/mlyons/jaffe.html">http://www.mis.atr.co.jp/mlyons/jaffe.html</a>
MID	<a href="http://www.nist.gov/srd/nistsd18.htm">http://www.nist.gov/srd/nistsd18.htm</a>
PIE Database	<a href="http://www.ri.cmu.edu/projects/project_418.html">http://www.ri.cmu.edu/projects/project_418.html</a>
The UMIST Face Database	<a href="http://images.ee.umist.ac.uk/danny/database.html">http://images.ee.umist.ac.uk/danny/database.html</a>
The University of Oulu Physics-Based Face Database	<a href="http://www.ee.oulu.fi/research/imag/color/pbfd.html">http://www.ee.oulu.fi/research/imag/color/pbfd.html</a>
The Yale Face Database B	<a href="http://cvc.yale.edu/projects/yalefacesB/yalefacesB.html">http://cvc.yale.edu/projects/yalefacesB/yalefacesB.html</a>
The Yale Face Database	<a href="http://cvc.yale.edu/projects/yalefaces/yalefaces.html">http://cvc.yale.edu/projects/yalefaces/yalefaces.html</a>
XM2VTSDB	<a href="http://www.ee.surrey.ac.uk/Research/VSSP/xm2vtsdb/">http://www.ee.surrey.ac.uk/Research/VSSP/xm2vtsdb/</a>
ソフトピアジャパン顔データベース	<a href="http://www.hoip.jp/web_catalog/top.html">http://www.hoip.jp/web_catalog/top.html</a>

表 3: 各種データベースと公開ウェブページ

顔認識法 3) モデルベースの顔認識法, という観点に基づき最近の動向を紹介した。顔研究は多岐にわたり論文数も多いので, 全てを網羅することは難しい。そこで, 本論文では, 重要と思われる手法を中心に紹介した。不足部分については, 是非, 筆者らにまでご指摘いただければ幸いである。

## 参考文献

- [1] G. Aggarwal, A. Roy-Chowdhury, and R. Chellappa. A system identification approach for video-based face recognition, 2004.
- [2] 赤松茂, 佐々木務, 深町映夫, 末永康仁. 濃淡画像マッチングによるロバストな正面顔の識別法 – フーリエスペクトルの KL 展開の応用 –. 信学論 D-II, Vol. J76-D-II, No. 7, pp. 1363–1373, 1993.
- [3] 赤松茂. コンピュータによる顔の認識 – サurvey –. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 80-DII, No. 8, pp. 2031–2046, August 1997.
- [4] O. Arandjelović and R. Cipolla. Face recognition from face motion manifolds using robust kernel resistor-average distance. In *IEEE Workshop on Face Processing in Video*, 2004.
- [5] Y. Ariki and N. Ishikawa. Integration of face and speaker recognition by subspace method. In *ICPR'96*, Vol. C, pp. 456–460, 1996.
- [6] Y. Ariki, N. Ishikawa, and Y. Sugiyama. Extraction and recognition of facial regions by subspace method. In *ACCV'95*, Vol. III, pp. 733–742, 1995.
- [7] M. Bartlett and T. Sejnowski. Independent components of face images: A representation for face recognition. *Proc. the 4th Annual Joint Symposium on Neural Computation, Pasadena, CA*, 1997.
- [8] M.S. Bartlett, J.R. Movellan, and T.J. Sejnowski. Face recognition by independent component analysis. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 13, No. 6, pp. 1450–1464, 2002.
- [9] R. Basri and D. Jacobs. Lambertian reflectance and linear subspaces. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 25, No. 2, pp. 218–233, 2003.
- [10] P N Belhumeur and J P Hespanha. Eigenface vs. Fisherfaces: recognition using class specific linear projection. *PAMI*, Vol. 19, No. 7, pp. 711–720, July 1997.
- [11] Peter N. Belhumeur, Joao Hespanha, and David J. Kriegman. Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection. In *ECCV (1)*, pp. 45–58, 1996.
- [12] P.N. Belhumeur, D.J.Kriegman, and A. L.Yuille. The bas-relief ambiguity. *Proc. CVPR '97*, pp. 1060–1066, 1997.
- [13] P.N. Belhumeur and D.J. Kriegman. What is the set of images of an object under all possible lighting conditions? In *CVPR*, pp. 270–277, 1996.
- [14] D.J. Beymer and T. Poggio. Face recognition from one example view. In *ICCV95*, pp. 500–507, 1995.
- [15] V. Blanz and T. Vetter. Face recognition based on fitting a 3D morphable model. *PAMI*, Vol. 25, No. 9, pp. 1063–1074, September 2003.
- [16] R. Brunelli and T. Poggio. Face recognition: Features versus templates. *PAMI*, Vol. 15, No. 10, pp. 1042–1052, October 1993.
- [17] G. Burel and Carel D. Detection and localization of faces on digital images. *PRL*, Vol. 15, No. 10, pp. 963–967, October 1994.
- [18] R. Chellappa, C.L. Wilson, and S. Sirohey. Human and machine recognition of faces: A survey. *PIEEE*, Vol. 83, No. 5, pp. 705–740, May 1995.
- [19] T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper, and J. Graham. Active shape models — their training and application. *CVIU*, Vol. 61, No. 1, pp. 38–59, January 1995.
- [20] T. Cootes and et. al. Active shape models—‘smart snakes’. In *BMVC1992*, pp. 266–275, 1992.
- [21] I.J. Cox, J. Ghosn, and P.N. Yianilos. Feature-based face recognition using mixture distance. In *CVPR*, pp. 209–216, 1996.
- [22] Ian Craw, Nicholas Costen, Takashi Kato, and Shigeru Akamatsu. How should we represent faces for automatic recognition? *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 21, No. 8, pp. 725–736, 1999.
- [23] J. L. Crowley and J. M. Bedrune. Integration and control of reactive visual processes. In *ECCV*, Vol. 2, pp. 47–58, 1994.
- [24] Y. Dai and Y. Nakano. Face-texture model based on SGLD and its application in face detection in a color scene. *PR*, Vol. 29, No. 6, pp. 1007–1017, June 1996.
- [25] J. Daugman. Face and gesture recognition: Overview. *PAMI*, Vol. 19, No. 7, pp. 675–679, 1997.
- [26] O. Déniz, M. Castrillón, and M. Hernández. Face recognition using independent component analysis and support vector machines. *Pattern Recogn. Lett.*, Vol. 24, No. 13, pp. 2153–2157, 2003.
- [27] M. Doi, O. Oshiro, K. Sato, and K. Chihara. Reliable face identification for access control. In *ACCV'95*, pp. Vol III: 723 – 727, 1995.
- [28] J. Draper, K. Baek, M.S. Bartlett, and J.R. Beveridge. Recognizing faces with PCA and ICA. *CVIU*, Vol. 91, No. 1/2, pp. 115–137, 2003.
- [29] E. Hjelmås and B. K. Low. Face detection: A survey. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 83, pp. 236–274, 2001.

- [30] G.J. Edwards, A. Lanitis, Christopher J. Taylor, and T.F. Cootes. Statistical models of face images: Improving specificity. *IVC*, Vol. 16, No. 3, pp. 203–211, March 1998.
- [31] G.J. Edwards, C.J. Taylor, and T.F. Cootes. Improving identification performance by integrating evidence from sequences. In *CVPR99*, pp. I: 486–491, 1999.
- [32] Stefan Eickeler, Stefan Mler, and Gerhard Rigoll. Recognition of JPEG compressed face images based on statistical methods. *IVC*, Vol. 18, No. 4, pp. 279–287, March 2000.
- [33] Shihong Lao et al. A fast 360-degree rotation invariant face detection system. in *ICCV2003 demo program*.
- [34] Raphaël Féraud, Olivier J. Bernier, Jean-Emmanuel Viallet, and Michel Collobert. A fast and accurate face detector based on neural networks. *PAMI*, Vol. 23, No. 1, pp. 42–53, January 2001.
- [35] Y Freund and R Schapire. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences*, Vol. 55, No. 1, pp. 119–139, August 1997.
- [36] 福井和広, 山口修, 鈴木薫, 前田賢一. 制約相互部分空間法を用いた環境変動にロバストな顔画像認識 照明変動の影響を抑える制約部分空間の学習. *信学論 (D-II)*, Vol. J82-D-II, No. 4, pp. 613–620, 1999.
- [37] 福井和広, 山口修. 一般化差分部分空間に基づく制約相互部分空間法. *信学論 (D-II)*, Vol. J87-D-II, No. 8, pp. 1622–1631, 2004.
- [38] A.S. Georghiadis, P.N. Belhumeur, and D.J. Kriegman. From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose. *PAMI*, Vol. 23, No. 6, pp. 643–660, June 2001.
- [39] D.B. Gerham and N.M. Allinson. Characterizing virtual eigensignatures for general purpose face recognition. In H. Wechsler, P.J. Phillips, V. Bruce, F. Fogelman-Soulie, and T.S. Huang, editors, *NATO-ASI on Face Recognition: From Theory to Applications*, Vol. 163 of *NATO-ASI Series F, Computer and Systems Science*, pp. 446–456. Springer Verlag, 1998.
- [40] F. Goudail, E. Lange, T. Iwamoto, K. Kyuma, and N. Otsu. Face recognition system using local autocorrelations and multiscale integration. *PAMI*, Vol. 18, No. 10, pp. 1024–1028, 1996.
- [41] V. Govindaraju, S. N. Srihari, and Sher D. B. A computational model for face location. In *ICCV*, pp. 718–721, 1990.
- [42] Ralph Gross, Iain Matthews, and Simon Baker. Appearance-based face recognition and light-fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 4, pp. 449–465, April 2004.
- [43] P. J. Grother, R.J. Micheals, and P.J. Phillips. Face recognition vendor test 2002 performance metrics. In Josef Kittler and Mark S. Nixon, editors, *AVBPA*, Vol. 2688 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 937–945. Springer, 2003.
- [44] G. Guo, S. Li, and K. Chan. Face recognition by support vector machines. In *AFGR2000*, pp. 196–201, 2000.
- [45] G. Guo and H. Zhang. Boosting for fast face recognition. In *ICCV Workshop on Recognition, Analysis, and Tracking of Faces and Gesturs in Real-Time Systems*, pp. 96–100, 2001.
- [46] H. Gupta, A.K. Agrawal, T. Pruthi, C. Shekhar, and R. Chellappa. An experimental evaluation of linear and kernel-based methods for face recognition. In *WACV02*, pp. 13–18, 2002.
- [47] Ziad M. Hafeed and Martin D. Levine. Face recognition using the discrete cosine transform. *IJCV*, Vol. 43, No. 3, pp. 167–188, July/August 2001.
- [48] P. Hallinan. A low-dimensional representation of human faces for arbitrary lighting conditions. In *CVPR*, pp. 995–999, 1994.
- [49] Bernd Heisele, Purdy Ho, Jane Wu, and Tomaso Poggio. Face recognition: component-based versus global approaches. *CVIU*, Vol. 91, No. 1/2, pp. 6–21, July/August 2003.
- [50] T. Hirayama, Y. Iwai, and M. Yachida. Parallelization between face localization and person identification. In *AFGR*, pp. 183–188, 2004.
- [51] Tin Kam Ho. The random subspace method for constructing decision forests. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 20, No. 8, pp. 832–844, 1998.
- [52] H. Hongo, M. Yasumoto, Y. Niwa, M. Ohya, and K. Yamamoto. Focus of attention for face and hand gesture recognition using multiple cameras. In *FG2000*, pp. 156–162, 2000.
- [53] J.A. Howell and H. Buxton. Face recognition using radial basis function neural networks. In *BMVC96*, p. Poster Session 2, 1996.
- [54] FaceKey [<http://www.face-id.jp/>].
- [55] FaceIT: <http://www.identixcom/>.
- [56] R. Huang, V. Pavlovic, and D. N. Metaxas. A hybrid face recognition method using Markov random fields. In *ICPR*, Vol. III, pp. 157–160, 2004.
- [57] A. Hyvärinen. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis. *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 10, No. 3, pp. 626–634, 1999.
- [58] T. Iijima, H. Genchi, and K. Mori. A theory of character recognition by pattern matching method. In *Proceedings of the 1st International*

- Joint Conference on Pattern Recognition, Washington, D.C.*, pp. 50–56, Feb. 1973.
- [59] M. Isard and A. Blake. CONDENSATION – conditional density propagation for visual tracking. *Int. J. Computer Vision*, Vol. 29, No. 1, pp. 5–28, 1998.
- [60] R. Ishiyama and S. Sakamoto. Geodesic illumination basis: Compensating for illumination variations in any pose for face recognition. In *ICPR2002 Vol.4*, pp. 297–301, 2002.
- [61] Y. P. Li J. Kittler and J. Matas. On matching scores for LDA-based face verification. In *BMVC2000*, 2000.
- [62] O. Jesorsky, K. J. Kirchberg, and R. Frischholz. Robust face detection using the Hausdorff distance. In *AVBPA*, pp. 90–95, 2001.
- [63] J.-L. Jiang and K.-F. Loe. S-adaboost and pattern detection in complex environment. In *CVPR*, pp. 413–418, Madison, WI, USA, 2003. IEEE CS.
- [64] M. Jones and P. Viola. Fast multi-view face detection. Technical Report TR2003-96, MERL, August 2003.
- [65] K. Jonsson, J. Kittler, Y. Li, and J. Matas. Support vector machines for face authentication, In *BMVC'99*, pp. 543–553, 1999.
- [66] P. Kalocsai, C. von der Malsburg, and J. Horn. Face recognition by statistical analysis of feature detectors. *IVC*, Vol. 18, No. 4, pp. 273–278, March 2000.
- [67] T Kanade. *Picture processing by computer complex and recognition of human faces*. PhD thesis, Kyoto University, 1973.
- [68] M. Kapfer. Detection of human faces in color image sequences with arbitrary motions for very low bit-rate videophone coding. *PRL*, Vol. 18, No. 14, pp. 1503–1518, December 1997.
- [69] M. Kass, A. P. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes: Active contour models. *ijcv*, Vol. 1, No. 4, pp. 321–331, January 1988.
- [70] B. Kepenekci, F.B. Tek, and G.B. Akar. Occluded face recognition based on Gabor wavelets. In *ICIP02*, Vol. I, pp. 293–296, 2002.
- [71] M. Kirby and L. Sirovich. Application of the Karhunen-Loève procedure for the characterization of human faces. *PAMI*, Vol. 12, No. 1, pp. 103–108, 1990.
- [72] Lian Hock Koh, Surendra Ranganath, and Y.V. Venkatesh. An integrated automatic face detection and recognition system. *PR*, Vol. 35, No. 6, pp. 1259–1273, June 2002.
- [73] Toshiaki Kondo and Hong Yan. Automatic human face detection and recognition under non-uniform illumination. *pr*, Vol. 32, No. 10, pp. 1707–1718, October 1999.
- [74] 小杉信. 個人識別のための多重ピラミッドを用いたシーン中の顔の探索・位置決め. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J77-D-II, No. 4, pp. 672–681, 1994.
- [75] K. Kotani, Chen Qiu, and T. Ohmi. Face recognition using vector quantization histogram method. In *ICIP*, Vol. II, pp. 105–108, 2002.
- [76] C. Kotropoulos, A. Tefas, and I. Pitas. Morphological elastic graph matching applied to frontal face authentication under well-controlled and real conditions. *PR*, Vol. 33, No. 12, pp. 1935–1947, December 2000.
- [77] 小坂谷達夫, 山口修, 福井和広. 制約相互部分空間法を用いた顔認識システムの開発と評価. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 3, pp. 951–959, 2004.
- [78] N. Kruger, M. Potzsch, and C. von der Malsburg. Determination of face position and pose with a learned representation based on labeled graphs. *IVC*, Vol. 15, No. 8, pp. 665–673, August 1997.
- [79] 栗田多喜夫, 堀田一弘, 三島健稔. Log-polar 画像の高次局所自己相関特徴を用いた大きさに不変な顔画像の認識. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 8, pp. 2209–2217, August, 1997.
- [80] T. Kurita, N. Otsu, and T. Sato. A face recognition method using higher order local autocorrelation and multivariate analysis. In *ICPR*, Vol. II, pp. 213–216, August/September 1992.
- [81] (財) 日本規格協会. 顔認証システムの精度評価方法. JIS 標準情報 TS/TR X0086, 日本規格協会, 2003. 有効期限 2006/3/31.
- [82] M. Lades, J. C. Vorbrüggen, J. Buhmann, J. Lange, C. von der Malsburg, R. P. Würtz, and W. Konen. Distortion invariant object recognition in the dynamic link architecture. *IEEE Trans. on Computers*, Vol. 42, pp. 300–311, 1993.
- [83] E. Land. The retinex theory of color vision. *Sci. Amer.*, Vol. 237, pp. 10–128, 1977.
- [84] A. Lanitis, C. J. Taylor, and T. F. Cootes. Automatic interpretation and coding of face images using flexible models. *PAMI*, Vol. 19, No. 7, pp. 743–756, 1997.
- [85] A. Lanitis, C.J. Taylor, and T.F. Cootes. Automatic identification of human faces using flexible appearance model. *IVC*, Vol. 13, No. 5, pp. 390–401, 1995.
- [86] 勞世斌, 小鶴俊幸, 岡本卓也, 田畑尚弘, 川出雅人. 360度回転対応高速顔検出システム. 第9回画像センシングシンポジウム論文集, pp. 511–514, 横浜, 日本, 6月 2003.
- [87] 勞, 山下, 岡本, 川出. 高速全方向顔検出. In *MIRU*, 第2巻, pp. 271–276, 2004.
- [88] H.J. Lee, W.S. Lee, and J.H. Chung. Face recognition using Fisherface algorithm and elastic graph matching. In *ICIP*, Vol. I, pp. 998–1001, 2001.

- [89] J. Lee, B. Moghaddam, H. Pfister, and R. Machiraju. Finding optimal views for 3D face shape modeling. In *Proc. of AFGR2004*, pp. 31–36, 2004.
- [90] K.C. Lee, J. Ho, M.H. Yang, and D.J. Kriegman. Video-based face recognition using probabilistic appearance manifolds. In *CVPR03*, pp. I: 313–320, 2003.
- [91] T. K. Leung, M. C. Burl, and P. Perona. Finding faces in cluttered scenes using random labeled graph matching. In *ICCV*, pp. 637–644, Cambridge, MA, 1995.
- [92] S Z Li, J W Lu, and K L Chan. Face detection using neural learning with optimized feature set. In *ACCV*, pp. 706–710, 2000.
- [93] S Z Li, X H Peng, X W Hou, and al et. Multi-view face pose estimation based on supervised isa learning. In *AFGR*, pp. 100–105, Washington, DC, USA, 2002.
- [94] S. Z. Li, Z.-Q. Zhang, H. SHum, and H.-J. Zhang. FloatBoost learning for classification. In *Annual Conference on Neural Information Processing System (NIPS)*, Vol. 15, Vancouver, Canada, 2002. MIT Press.
- [95] S Z Li, L Zhu, Z. Zhang, and H. Zhang. Learning to detect multi-view faces in real-time. In *The 2nd International Conference on Development and Learning (ICDL02)*, pp. 172–177, 2002.
- [96] S Li, L Zhu, Z. Zhang, A. Blake, H. Zhang, and H. Shum. Statistical learning of multi-view face detection. In *ECCV*, Vol. IV, p. 67, 2002.
- [97] Y. Li, S. Gong, S. Liddel, and H. Liddel. Multi-view face detection using support vector machines and eigenspace modeling. In *4th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies*, pp. 241–244, Brighton, UK., 2000. IEEE CS.
- [98] Y. Li, S. Gong, and H. Liddell. Modelling faces dynamically across views and over time. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 554–559, 2001.
- [99] R. Lienhart and J. Maydt. An extended set of Haar-like features for rapid object detection. In *ICIP*, pp. 900–903, Rochester, NY, USA, 2002. IEEE CS.
- [100] S. H. Lin, S. Y. Kung, and L. J. Lin. Face recognition/detection by probabilistic decision-based neural network. *IEEE Transactions on Neural Network*, Vol. 8, No. 1, pp. 114–132, 1997.
- [101] Y. Ling, X. Yin, and S.M. Bhandarkar. Sirface vs. Fisherface: recognition using class specific linear projection. In *ICIP03*, pp. III: 885–888, 2003.
- [102] C. Liu and H.Y. Shum. Kullback-leibler boosting. In *CVPR*, Vol. I, pp. 587–594, Madlson, Wisconsin, June 2003.
- [103] C. Liu and H. Wechsler. Independent component analysis of Gabor features for face recognition. *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 14, No. 4, pp. 919–928, 2003.
- [104] X. Liu and T. Chen. Video-based face recognition using adaptive hidden Markov models. In *CVPR03*, pp. I: 340–345, 2003.
- [105] X. Lu and A.K. Jain. Resampling for face recognition. In *AVBPA03*, pp. 869–877, 2003.
- [106] J. Lyons, S. Akamatsu, M. Kamachi, and J. Gyoba. Coding facial expression with Gabor wavelets. In *FG*, pp. 200–205, Nara, Japan, April 1998. IEEE.
- [107] Y. Ma and X.-Q. Ding. Real-time rotation invariant face detection based on cost-sensitive AdaBoost. In *ICIP*, pp. 921–924, Barcelona, Spain, 2003. IEEE CS.
- [108] Y. Ma and X.-Q. Ding. Robust multi-view face detection and pose estimation based on cost-sensitive AdaBoost. In *ACCV*, pp. 103–108, Jeju, Korea, 2004. Springer.
- [109] 前田賢一, 渡辺貞一. 局所的構造を導入したパターン・マッチング法. *電子情報通信学会論文誌 (D)*, Vol. J68-D, No. 3, pp. 345–352, 1985.
- [110] Dario Maio and Davide Maltoni. Real-time face location on gray-scale static images. *pr*, Vol. 33, No. 9, pp. 1525–1539, September 2000.
- [111] E. Marszalec, B. Martinkauppi, and M. Soriano M. Pietikänen. A physics-based face database for color research. *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 9, No. 1, pp. 32–38, 2000.
- [112] A.M. Martinez and R. Benavente. The AR face databasae. Technical Report 24, CVC, June 1998.
- [113] A. Matsui, S. Clippingdale, F. Uzawa, and T. Matsumoto. Bayesian face recognition using a Markov chain monte carlo method. In *ICPR*, pp. 918–921, 2004.
- [114] S.J. McKenna, S.G. Gong, and Y. Raja. Face recognition in dynamic scenes. In *BMVC97*, 1997.
- [115] K. Messer, J. Matas, J. Kittler, and K. Jonsson. XM2VTSDB: The extended M2VTS database. In *Audio- and Video-based Biometric Person Authentication, AVBPA'99*, pp. 72–77, Washington, D.C., March 1999. 16 IDIAP-RR 99-02.
- [116] 三輪祥太郎, 羽島一夫, 鹿毛裕史, 橋本学, M. Jones, J. Thornton. Rectangle filter の最適選択に基づく高速顔認証システム, 2004.
- [117] B. Moghaddam, T. Jebara, and A. Pentland. Bayesian face recognition. *Pattern Recognition*, Vol. 33, No. 11, pp. 1771–1782, November 2000.
- [118] B. Moghaddam, W. Wahid, and A.P. Pentland. Beyond Eigenfaces: Probabilistic matching for face recognition. In *AFGR98*, pp. 30–35, 1998.

- [119] Baback Moghaddam and Alex Paul Pentland. Probabilistic visual learning for object representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 7, pp. 696–710, 1997.
- [120] Kenji Nagao. Face recognition by distribution specific feature extraction. In *Proc. of CVPR 2000 Volume 1*, pp. 278–285, 2000.
- [121] Kenji Nagao and Masaki Sohma. Weak orthogonalization of face and perturbation for recognition. In *Proc. of CVPR 1998*, pp. 845–852, 1998.
- [122] A. Nakashima, A. Maki, and K. Fukui. Constructing illumination image basis from object motion. In *Proc. ECCV 2002(LNCS 2352)*, pp. 195–209, 2002.
- [123] A V Nefian and M H Hayes. Face detection and recognition using hidden Markov models. In *Proc of International Conference on Image Processing*, Vol. 1, pp. 141–145, 1998.
- [124] A.V. Nefian and M.H. Hayes III. Hidden Markov models for face recognition. In *ASSP*, Vol. 5, pp. 2721–2724, October 1998.
- [125] 西山正志, 山口修, 福井和広. アンサンブル学習を用いた多重制約相互部分空間法による顔認識. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004)Proc.I, pp. 529–534, 2004.
- [126] 岡部孝弘, 佐藤洋一. ランダムサンプルコンセンサスを用いた光学的アラインメントに基づく物体認識. 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, No. No.SIG 9 (CVIM 7), pp. 124–131, July 2003.
- [127] Edgar Osuna, Robert Freund, and Federico Girosi. Training support vector machines: an application to face detection. In *CVPR*, pp. 130–136, 1997.
- [128] H. Othman and T. Aboulnasr. A separable low complexity 2D HMM with application to face recognition. *PAMI*, Vol. 25, No. 10, pp. 1229–1238, October 2003.
- [129] Penio S. Penev and Joseph J. Atick. Local feature analysis: A general statistical theory for object representation. *Network: Computation in Neural Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 477–500, 1996.
- [130] A. Pentland, B. Moghaddam, and T. Starner. View-based and modular Eigenspaces for face recognition. In *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*, Seattle, WA, June 1994.
- [131] Jonathon Phillips. Support vector machines applied to face recognition. *Proceedings of the 1998 conference on Advances in neural information processing systems II*, pp. 803–809, July 1999.
- [132] P. J. Phillips, H. Moon, S. A. Rizvi, and P. J. Rauss. The FERET evaluation methodology for face-recognition algorithms. *PAMI*, Vol. 22, No. 10, pp. 1090–1104, 2000.
- [133] P.J. Phillips, P.J. Grother, R.J. Micheals, D.M. Blackburn, E. Tabassi, and M. Bone. Face recognition vendor test 2002. In *AMFG03*, pp. 44–44, 2003.
- [134] P.J. Phillips, H. Wechsler, J. Huang, and P. Rauss. The FERET database and evaluation procedure for face recognition algorithm. *IVC*, Vol. 16, No. 5, pp. 295–306, 1998.
- [135] J.C. Platt. Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines. MSR-TR 98-14, Microsoft Research, 1998.
- [136] Massimiliano Pontil and Alessandro Verri. Support vector machines for 3D object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 6, pp. 637–646, 1998.
- [137] D. Pramadihanto, Y. Iwai, and M. Yachida. A flexible feature matching for automatic face and feature points detection. In *ICPR*, Vol. I, pp. 92–95, 1998.
- [138] M. Propp and A. Samal. Artificial neural network architectures for human face detection. *Intelligent Eng. Systems through Artificial Neural Networks*, Vol. 2, , 1992.
- [139] P. Pudil, J. Novovicova, and J. Kittler. Float search methods in feature selection. *PRL*, Vol. 15, No. 11, pp. 1119–1125, 1994.
- [140] Y. Qi, D. Doermann, and D. Dementhon. Hybrid independent component analysis and support vector machine learning scheme for face detection. In *ICASSP*, Vol. 3, pp. 14810–1484, 2001.
- [141] R. Ramamoorthi. Analytic PCA construction for theoretical analysis of lighting variability in images of a lambertian object. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 24, No. 10, pp. 1322–1333, 2002.
- [142] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan. On the relationship between radiance and irradiance: determining the illumination from images of a convex lambertian object. *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 18, No. 10, pp. 2448–2459, 2001.
- [143] T. Riklin-Raviv and A. Shashua. The quotient image: Class based recognition and synthesis under varying illumination conditions. In *CVPR99*, pp. II: 566–571, 1999.
- [144] Dan Roth, Ming-Hsuan Yang, and Narendra Ahuja. A SNoW-based face detector. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Vol. 12, pp. 855–861, 2000.
- [145] H.A. Rowley, S. Baluja, , and T. Kanade. Rotation invariant neuralnetwork-based face detection. In *Proc of IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 38–44, 1998.
- [146] H.A. Rowley. *Neural Network-Based Face Detection*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1999.

- [147] H.A. Rowley, S. Baluja, and T. Kanade. Neural network-based face detection. *PAMI*, Vol. 20, No. 1, pp. 23–38, January 1998.
- [148] R. Kh. Sadykhov, V. A. Samokhval, and L.P. Podenok. Face recognition algorithm on the basis of truncated Walsh-Hadamard transform and synthetic discriminant functions. In *AFGR04*, pp. 219–222, 2004.
- [149] H. Sahbi, D. Geman, and N. Boujemaa. Face detection using coarse-to-fine support vector classifiers. In *ICIP*, Vol. III, pp. 925–928, 2002.
- [150] 坂井利之, 長尾真, 木戸出正継. 電子計算機による濃淡図形の処理 - 顔写真の場合 - . 電子通信学会論文誌, Vol. 54-C, No. 6, pp. 445–452, 1971.
- [151] T. Sakai, M. Nagao, and S. Fujibayashi. Line extraction and pattern recognition in a photograph. *PR*, Vol. 1, pp. 233–248, 1969.
- [152] T. Sakai, T. Nagao, and T. Kanade. Computer analysis and classification of photographs of human faces. *Seminar*, pp. 55–62, October 1973.
- [153] Toshiyuki Sakai, Makoto Nagao, and Masatsugu Kidode. Processing of multilevel pictures by computer - the case of photographs of human face. *Systems Computers Controls*, Vol. 2, No. 3, pp. 47–54, 1971.
- [154] 坂野鋭, 武川直樹, 中村太一. 核非線形相互部分空間法による物体認識. 信学論 (D-II), Vol. J84-D-II, No. 8, pp. 1549–1556, 2001.
- [155] 坂上彦彦, 尺長健. 正規化固有空間への最適部分射影とその応用. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. SIG(CVIM8), pp. 100–108, 2003.
- [156] Ferdinando Samaria and Steve Young. A HMM-based architecture for face identification. *Image and Vision Computing*, Vol. 12, No. 8, pp. 537–543, 1994.
- [157] F.S. Samaria. Face segmentation for identification using hidden markov models. In *BMVC93*, pp. 399–408, 1993.
- [158] F.S. Samaria and A. Harter. Parameterisation of a stochastic model for human face identification. In *Proc. 2nd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV94)*, pp. 138–142, Sarasota, FL, USA, December 1994.
- [159] 佐藤俊雄, 助川寛, 横井謙太郎, 土橋浩慶, 緒方淳, 岡崎彰夫. 立ち位置変動を考慮した顔照合セキュリティシステム「FacePass」の開発. 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 7, pp. 1111–1117, 2002.
- [160] M. Savvides, B.V.K.V. Kumar, and P.K. Khosla. Corefaces-robust shift invariant PCA based correlation filter for illumination tolerant face recognition. In *CVPR04*, pp. II: 834–841, 2004.
- [161] M. Savvides, B.V.K.V. Kumar, and P.K. Khosla. Eigenphases vs. Eigenfaces. In *ICPR04*, pp. III: 810–813, 2004.
- [162] R. Schapire and Y. Singer. Improved boosting algorithms using confidence-rated predictions. *Machine Learning*, Vol. 37, No. 3, pp. 297–336, 1999.
- [163] H. Schneiderman. *3D object detection using a Maximalist statistical representation: faces and cars*. PhD thesis, CMU, 2000.
- [164] H. Schneiderman and T. Kanade. A statistical method for 3D object detection applied to faces and cars. In *CVPR*, Vol. 1, pp. 746–751, Hilton Head Island, USA, 2000.
- [165] Henry Schneiderman and Takeo Kanade. Probabilistic modeling of local appearance and spatial relationships for object recognition. In *CVPR*, pp. 45–51, 1998.
- [166] G. Shakhnarovich, J.W. Fisher, and T.J. Darrell. Face recognition from long-term observations. In *ECCV02*, p. III: 851 ff., 2002.
- [167] A. Shashua. *Geometry and photometry in 3D visual recognition*, 1992.
- [168] A. Shashua and T. Riklin-Raviv. The quotient image: Class-based re-rendering and recognition with varying illuminations. *PAMI*, Vol. 23, No. 2, pp. 129–139, February 2001.
- [169] 髙田聡, 小池秀樹, 伴野明, 石井健一郎. 顔の向きによらない人物識別のための辞書構成法. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J78-D-II, No. 11, pp. 1639–1649, 1995.
- [170] T. Sim, S. Baker, and M. Bsat. The CMU pose, illumination and expression database. *PAMI*, Vol. 25, No. 12, pp. 1615–1618, December 2003.
- [171] L. Sirovich and M. Kirby. Low-dimensional procedure for the characterization of human faces. *J. of the Optical Society of America A*, Vol. 4, No. 3, pp. 519–524, 1987.
- [172] F. Smeraldi and J. Bigun. Retinal vision applied to facial features detection and face authentication. *PRL*, Vol. 23, No. 4, pp. 463–475, February 2002.
- [173] F. Smeraldi, N. Capdevielle, and J. Bigun. Face authentication by retinotopic sampling of the Gabor decomposition and support vector machines. In *AVBPA*, 1999.
- [174] Franc Solina, Peter Peer, Borut Batagelj, Samo Juvan, and Jure Kovac. Color-based face detection in the “15 seconds of fame” art installation. In *Conference on Computer Vision / Computer Graphics Collaboration for Model-based Imaging, Rendering, Image Analysis and Graphical Special Effects*, pp. 38–47, INRIA Rocquencourt, France, March 2003. INRIA.
- [175] Q.B. Sun, W.M. Huang, and J.K. Wu. Face detection based on color and local symmetry information. In *AFGR98*, pp. 130–135, 1998.



- [176] Kah-Kay Sung and Tomaso Poggio. Example-based learning for view-based human face detection. *PAMI*, Vol. 20, No. 1, pp. 39–51, January 1998.
- [177] Daniel L. Swets and John Weng. Using discriminant eigenfeatures for image retrieval. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 18, No. 8, pp. 831–836, 1996.
- [178] Daniel L. Swets and John Weng. Discriminant analysis and eigenspace partition tree for face and object recognition from views. *Proceedings of the 2nd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG '96)*, p. 192, October 14–16, 1996.
- [179] Anastasios Tefas, Constantine Kotropoulos, and Ioannis Pitas. Using support vector machines to enhance the performance of elastic graph matching for frontal face authentication. *PAMI*, Vol. 23, No. 7, pp. 735–746, July 2001.
- [180] J.C. Terrillon, M.N. Shirazi, H. Fukamachi, and S. Akamatsu. Comparative performance of different skin chrominance models and chrominance spaces for the automatic detection of human faces in color images. In *AFGR*, pp. 54–61, 2000.
- [181] Matthew Turk and Alex Paul Pentland. Eigenfaces for recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol. 3, No. 1, pp. 71–86, 1991.
- [182] M. A. O. Vasilescu and D. Terzopoulos. Multilinear independent component analysis. In *Learning 2004 Snowbird*, 2004.
- [183] M. Alex O. Vasilescu and Demetri Terzopoulos. Multilinear analysis of image ensembles: Tensor-faces. In *ECCV*, Vol. 1, pp. 447–460, 2002.
- [184] P. Viola and M. Jones. Robust real-time object detection. Technical report, Cambridge Research Laboratory, February 2001.
- [185] Paul Viola and Michael Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *CVPR*, Vol. I, pp. 511–518, 2001.
- [186] H. Wang, S. Z. Li, and Y. Wang. Face recognition under varying lighting conditions using self quotient image. In *AFGR*, pp. 819–824, 2004.
- [187] H. Wang, S. Z. Li, and Y. Wang. Generalized quotient image. In *CVPR2004*, pp. 498–505, 2004.
- [188] X. Wang and X. Tang. Random sampling LDA for face recognition. In *CVPR04*, pp. II: 259–265, 2004.
- [189] S. Watanabe. Karhunen-loève expansion and factor analysis. In *Transactions of the 4th Prague Conference on Information Theory, Statistical Decision Functions, and Random Processes, Prague*, pp. 635–660, 1965.
- [190] S. Watanabe, P. F. Lambert, C. A. Kulikowski, J. L. Buxton, and R. Walker. Evaluation and selection of variables in pattern recognition. In *In J. Tou (Ed.), Computer and Information Sciences II. New York: Academic Press.*, 1967.
- [191] L. Wiskott. Phantom faces for face analysis. *PR*, Vol. 30, No. 6, pp. 837–846, 1997.
- [192] L. Wiskott, J. M. Fellous, N. Krüger, and C. von der Malsburg. Face recognition by elastic bunch graph matching. *PAMI*, Vol. 19, No. 7, pp. 775–779, 1997.
- [193] L. Wiskott, J. M. Fellous, N. Krüger, and C. von der Malsburg. Face recognition by elastic bunch graph matching. *Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition, CRC Press*, pp. 355–396, 1999.
- [194] L. Wolf and A. Shashua. Kernel principal angles for classification machines with applications to image sequence interpretation In *CVPR*, Vol. I, pp. 635–640, 2003.
- [195] 呉海元, 陳謙, 谷内田正彦. ファジィパターン照合を用いた色彩画像からの顔検出システム. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-DII, No. 7, pp. 1774–1785, 1997.
- [196] 呉海元, 小林弘知, 塩山忠義, 陳謙, 島田哲夫. 色彩動画画像からの頭部ジェスチャー認識システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 577–584, 1999.
- [197] R. P. Würtz. Object recognition robust under translation, deformation, and changes in background. *PAMI*, Vol. 19, No. 7, pp. 769–774, 1997.
- [198] Rong Xiao, Long Zhu, and Hong-Jiang Zhang. Boosting chain learning for object detection. In *ICCV*, pp. 709–715, 2003.
- [199] 山口修, 福井和広. 顔向きや表情変化にロバストな顔認識システム “Smartface”. 信学論 (D-II), Vol. J84-D-II, No. 6, pp. 1045–1052, 2001.
- [200] O. Yamaguchi, K. Fukui, and K. Maeda. Face recognition using temporal image sequence. In *FG '98: Proceedings of the 3rd. International Conference on Face & Gesture Recognition*, p. 318. IEEE Computer Society, 1998.
- [201] 山元宣政, 重成一真, 尺長健. 仮想部分空間法による照明変動に影響されない顔認識. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J84-D-II, No. 8, pp. 1753–1761, 2001.
- [202] G. Z. Yang and T. S. Huang. Human face detection in a complex background. *PR*, Vol. 27, No. 1, pp. 53–63, 1994.
- [203] J. Yang, Z. Jin, J.Y. Yang, D. Zhang, and A.F. Frangi. Essence of kernel Fisher discriminant: KPCA plus LDA. *PR*, Vol. 37, No. 10, pp. 2097–2100, October 2004.
- [204] J Yang and A Waibel. A real-time face tracker. In *In Proceedings of the Third Workshop on Applications of Computer Vision*, pp. 142–147, 1996.

- [205] J. Yang and J.Y. Yang. From image vector to matrix: a straightforward image projection technique: IMPCA vs. PCA. *PR*, Vol. 35, No. 9, pp. 1997–1999, September 2002.
- [206] J. Yang, D. Zhang, A.F. Frangi, and J.Y. Yang. Two-dimensional PCA: A new approach to appearance-based face representation and recognition. *PAMI*, Vol. 26, No. 1, pp. 131–137, January 2004.
- [207] M. H. Yang, N. Ahuja, and Kriegman D. Face detection using mixtures of linear subspaces. In *AFGR*, pp. 70–76, 2000.
- [208] M.H. Yang. Kernel Eigenfaces vs. kernel Fisher-faces: Face recognition using kernel methods. In *AFGR02*, pp. 205–211, 2002.
- [209] M.H. Yang, N. Ahuja, and D.J. Kriegman. Face recognition using kernel Eigenfaces. In *ICIP00*, pp. Vol I: 37–40, 2000.
- [210] Ming-Hsuan Yang and Narendra Ahuja. *Face detection and gesture recognition for human-computer interaction*. The Kluwer International Series in Video Computing. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2001.
- [211] Ming-Hsuan Yang, David J. Kriegman, and Narendra Ahuja. Detecting faces in images: A survey. *PAMI*, Vol. 24, No. 1, pp. 34–58, January 2002.
- [212] A. Yilmaz and M. Gökmen. Eigenhill vs. Eigenface and Eigenedge. In *ICPR*, Vol. II, pp. 831–834, 2000.
- [213] K.S. Yoon, Y.K. Ham, and R.H. Park. Hybrid approaches to frontal view face recognition using the hidden Markov model and neural-network. *PR*, Vol. 31, No. 3, pp. 283–293, March 1998.
- [214] K. C. Yow and R. Cipolla. A probabilistic framework for perceptual grouping of features for human face detection. In *AFGR*, pp. 16–21, 1996.
- [215] A. L. Yuille, D. S. Cohen, and Hallinan P. W. Feature extraction from faces using deformable templates. In *CVPR*, pp. 104–109, 1989.
- [216] A. Yuille, D. Snow, R. Epstein, and P. Belhumeur. Determining generative models of objects under varying illumination: shape and albedo from multiple images using SVD and integrability. *Int. J. Computer Vision*, Vol. 35, No. 3, pp. 203–222, 1999.
- [217] S. Zhao and R.-R. Grigat. Multiblock-fusion scheme for face recognition. In *ICPR*, Vol. 1, pp. 309–312, 2004.
- [218] W. Zhao, R. Chellappa, P. J. Phillips, and A. Rosenfeld. Face recognition: A literature survey. *ACM Comput. Surv.*, Vol. 35, No. 4, pp. 399–458, 2003.
- [219] W.Y. Zhao. Discriminant component analysis for face recognition. In *ICPR00*, pp. Vol II: 818–821, 2000.
- [220] W.Y. Zhao. Performance perturbation analysis of eigen-systems. In *ICPR00*, pp. Vol II: 105–108, 2000.
- [221] S. Zhou, V. Krueger, and R. Chellappa. Probabilistic recognition of human faces from video. *CVIU*, Vol. 91, No. 1-2, pp. 214–245, July 2003.
- [222] S.K. Zhou, R. Chellappa, and B. Moghaddam. Intra-personal kernel space for face recognition. In *AFGR04*, pp. 235–240, 2004.