

# 複数視点画像を用いた顔画像認識

筑波大学大学院 システム情報工学研究科

福井 和広

## 1 はじめに

### 1.1 まえがき

最近のセキュリティに対するニーズの高まりとともに、指紋、虹彩、手形、顔、音声などの生体特徴（バイオメトリクス）を用いた個人認証技術に対する関心が高まっている [1, 2]。本稿では、これらの中で顔画像を用いた認証技術に焦点を当て、動画あるいはマルチカメラから得られる複数視点画像を用いた顔認識技術を紹介する。

顔画像による個人認証は、既に使われている掌形や指紋による認証に対して、最近、ようやく実用化の段階に入りつつある技術であり、指紋、掌形などを用いた接触型の方式に対して、非接触で実現できるためユーザにとって極めて自然である。しかしながら、顔認識を計算機で実現することは極めて難しい。顔認識とよく比較される指紋認識では、主にセンサーに押し付けられた2次元の指紋パターンを対象とする。これに対して顔認識では表情変化などにより柔軟に変形する複雑な3次元物体が対象である。このため顔パターンは同一人物でも、視点、顔向き、表情、光源の変動により大きく変化し、実際には髪型、化粧、眼鏡の有無、加齢などによるパターン変動がこれに加わる。一方、目、鼻、口などの基本部位から構成される顔の造りは、個人に依らずに万人共通である。他人との識別を可能としているのは各部位の形状や配置の微妙な違いである。このような顔パターンの特性が、顔認識を極めて困難な課題としている [3]。顔画像認識の本質は、「如何に顔向き、表情、照明などの変動による同一人物内の変動を抑制し、識別に必要な他人との差異を抽出し、識別するか」にあると言える。この難問に対して、次章で述べる様々な方法が提案されている。

### 1.2 顔画像認識の概要

顔画像認識は、入力画像からの顔パターン抽出しと、抽出した顔パターンに対する識別から構成される。

顔パターン抽出しでは、目などの顔特徴点を基準にして、入力画像から顔向き、大きさを一定に正規化した矩形の顔パターンを抽出する。この際、画像中から直接顔特徴点を検出するのは計算コストが大きいため、あらかじめ大まかな顔領域を限定しておき、この領域のみを顔特徴点抽出の対象領域とする [3]。

これに続く顔パターン識別では、まず切り出された顔パターンから、顔向き、表情、照明などの変動の影響を受け難く、識別に有効な特徴を抽出する。次に抽出された識別特徴と事前に学習された各人物の識別特徴との統計的な距離を算出し、これを類似度とする。そして類似度がしきい値以上で、最も高い値に該当する人物を本人と同定する。

識別特徴は、大まかには構造特徴と画像パターン特徴に分類できる。構造特徴は瞳、鼻孔、目頭、目尻、口端などの特徴部位の形状や配置情報をベクトル化したものである。構造特徴は顔において何を意味するのかが直感的に把握し易く、1973年の金出による先駆的な研究 [4] ではこの特徴が使われた。一方、画像パターン特徴は顔全体もしくは部分パターンを各画素の輝度を成分とするベクトルデータに展開したものである。例えば  $f$  ピクセル  $\times$   $f$  ピクセルの顔パターンは各画素の輝度値を成分とする  $f \times f$  次元空間のベクトルと見なす。顔パターンをある種の文字だと考えると、これまでに開発された様々な文字認識技術が適用可能であることが理解される。

識別特徴に着目してこれまでの顔画像識別を振り返ると、大まかには図1に示すような流れとなる。研究が始まった1970年台当初は構造特徴に基づく方法が主流であったが、1991年に固有顔 [5] に基づく識別法 [6] が提案されて以来、画像パターン特徴に基づく方法が主流と



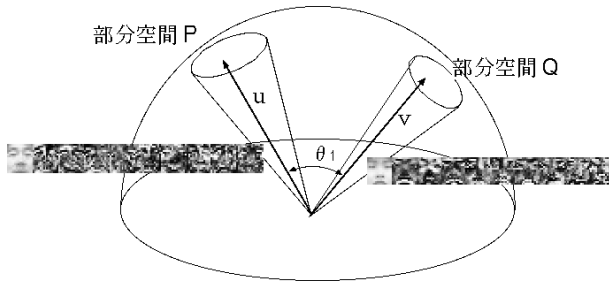


図 3: 相互部分空間法の概念

変動に対する高い吸収能力が期待できる [16]。更に顔パターンの分布形状はその人物の顔の 3 次元的な形状を反映していることを考えると、2 つのパターン分布形状を比較することは、顔を様々な視点から見て 3 次元的に認識することに相当している。これからも従来の 2 次元的な認識に比べて高い識別率が実現できることが理解できる [26]。パターン分布形状の比較は、次節で述べる相互部分空間法 (Mutual subspace method(MSM))[15] の枠組みを適用することで実現できる [20]。

## 2.2 相互部分空間法のアルゴリズム

相互部分空間法 (以下、MSM) は部分空間法 [9] の自然な拡張であり、入力側もベクトルから部分空間に置き換えることでパターン変動に対する吸収能力を更に高めた方法である。MSM では図 3 に示すように、入力部分空間と辞書部分空間のなす最小角度  $\theta_1$  に基づいて識別を行なう。M 次元入力部分空間を P、N 次元辞書部分空間を Q とすると、最小角  $\theta_1$  に関して次式が成り立つ。

$$\cos^2\theta_1 = \sup_{\substack{u \in P, v \in Q \\ \|u\| \neq 0, \|v\| \neq 0}} \frac{|(\mathbf{u}, \mathbf{v})|^2}{\|\mathbf{u}\|^2 \|\mathbf{v}\|^2} \quad (1)$$

部分空間  $Q_k$  の基底ベクトル  $\mathbf{e}_k$  はカテゴリ  $Q_k$  に属するベクトル  $\mathbf{x}_{kj} (j = 1 \sim n_k)$  から計算される自己相関行列  $\mathbf{R}_k$  の固有ベクトルとして求まる。各カテゴリの次元数は実験あるいは固有値の寄与率に基づいて決める。

2 つの部分空間の成す角度は統計学において正準角と呼ばれ、M 次元部分空間 P と N 次元部分空間 Q (便宜上、 $M \geq N$  と仮定) の間には N 個の正準角が定義できる。第 2 正準角  $\theta_2$  は最小正準角  $\theta_1$  に直交する方向において計った最小角、同様に第 3 正準角  $\theta_3$  は第 2 正準角  $\theta_2$  に直交する方向で計った最小角である。以下同様に N 個

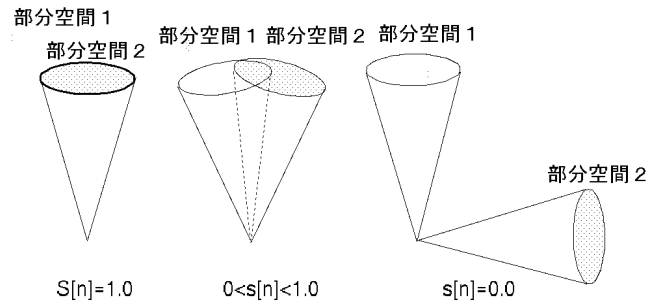


図 4: 部分空間の構造的な類似性

の正準角が順次求まる。

## 2.3 正準角の計算

正準角  $\theta$  の算出が部分空間に対する射影行列の積に対する固有値問題に帰着されることは統計学では古くから知られていた。これによると部分空間 P、Q の基底ベクトルから計算される射影行列 Q、P の積 QP (あるいは PQ) の第 i 番目に大きい固有値が  $\cos^2\theta_i$  となる [17]。ただし計算上は上の固有値問題は、以下の小さい行列 S の固有値問題に変換でき、その最大固有値から最小正準角が求まる。

$$\mathbf{S}\mathbf{a} = \lambda\mathbf{a} \quad (2)$$

$$\mathbf{S} = (x_{ij}), (i, j = 1 \sim N) \quad (3)$$

$$x_{ij} = \sum_{m=1}^N (\psi_i, \phi_m)(\phi_m, \psi_j)$$

ここで  $\psi_i$  と  $\phi_i$  は、それぞれ部分空間 P と Q の i 番目の基底ベクトルである。

## 2.4 顔の 3 次元形状を反映した類似度

前節で求めた正準角を用いて、2 つの部分空間の構造的な類似性を表す尺度として、以下の類似度  $S[n]$  を定義する<sup>1</sup>。

$$S[n] = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{n} \quad (4)$$

ここで固有値  $\lambda_i$  は、式 (3) から得られる i 番目の固有値、n は使用する固有値の数である。類似度  $S[n]$  は図

<sup>1</sup>正準角の扱いに関しては更に検討が必要であり、例えば写真と実顔の判定において重要な情報となる [22]。

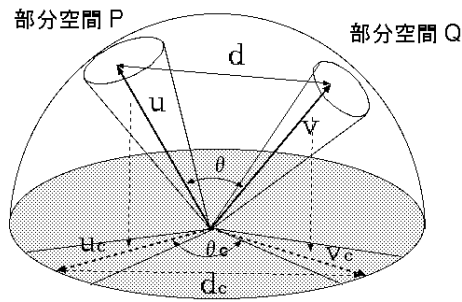


図 5: 制約相互部分空間法の概念

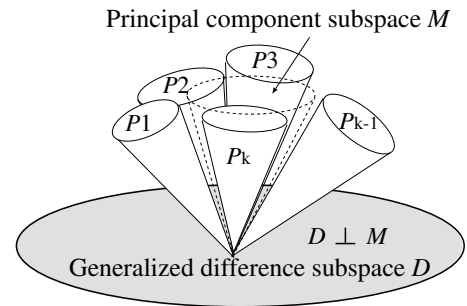


図 6: 一般化差分部分空間の概念図

4 に示すように、2 つの部分空間が完全に一致する時には最大値 1.0 となり、両者が離れるにつれて低下してゆき、完全に両者が直交する時に最小値 0.0 となる。

### 3 制約相互部分空間法による高精度化

#### 3.1 制約相互部分空間法のアルゴリズム

相互部分空間法の枠組みに基づいて高性能な 3 次元物体認識が実現できるが、識別の観点から見ると未だ不十分である。これは部分空間法ベースの方法に共通して言えることだが、各部分空間が他の部分空間との関係を考慮されずに生成されるためである。本来、高い識別性能を実現するためには、両者の 3 次元形状の差異が顕著に現われる画像部分 (画素) を選択的に使うことが有効である。これは文字認識において、“犬” と “大” を識別するためには、点の有無を調べることが有効であることから類推できる。

これまでに部分空間法に関しては、他カテゴリとの関係を考慮に入れた様々な改良法 [11, 10] が提案されている。相互部分空間法に対しても同様に、識別性能を大幅に向上させる制約相互部分空間法 (Constrained mutual subspace method (以下、CMSM))[19, 21] が提案されている。CMSM では「識別に必要な変動は含み、不要な変動は含まない」という制約条件をできるだけ満足する特徴空間  $C$  (制約部分空間) を導入し、図 5 に示すように、識別すべき 2 つの部分空間  $P$  と  $Q$  の制約部分空間  $C$  への射影  $P^c$  と  $Q^c$  に対して相互部分空間法を適用する。制約部分空間への射影は各部分空間から識別に必要な特徴を選択的に抽出することに相当し、射影部分空間  $P^c$  と  $Q^c$  に対して求まる差分ベクトルには不要な変動が含まれない。これを顔認識に適用すると、比較する人物

の 3 次元形状の差異が顕著に表れる画像成分を選択的に用いた高精度な顔識別が行えることになる。

#### 3.2 制約部分空間の生成

前節で導入した制約部分空間とは識別性能を高めるための特徴空間の総称であり、本稿では 2 つの部分空間の差異を表す差分部分空間の一般化である一般化差分部分空間 [21, 20] を用いる。一般化差分部分空間  $D$  は  $k$  個の  $n$  次元クラス部分空間に対する射影行列  $P_i (i=1 \sim k)$  の総和  $G$  の固有ベクトルで、固有値  $\lambda$  が小さい方から順に選んだ  $n_c$  個のベクトル  $d_{n \times k}, d_{n \times k-1}, \dots, d_{n \times k-n_c+1}$  により張られる。

$$Gd = \lambda d \quad (5)$$

$$G = P_1 + P_2 + \dots + P_k$$

一般化差分部分空間  $D$  の有効性に関しては幾つかの解釈が可能である。定性的に言えば、一般化差分部分空間は 2 つのクラス部分空間の差異を表す差分部分空間を、 $k$  個のクラス部分空間に対して一般化した空間で、 $k$  個のクラス部分空間の差異を表す空間となっている [21]。したがって一般化差分部分空間への射影は、各クラス部分空間からクラス部分空間の違いを表す成分を選択的に抽出していることに相当する。別の見方をすれば、図 6 に示すように、一般化差分部分空間は全クラス部分空間の和空間から本来識別に貢献しない全クラス部分空間に共通的な主成分空間  $M$  を取り除いた空間になっている。

幾何学的に見ると、一般化差分部分空間へ射影された各クラス部分空間の関係は、射影前に比べてお互いに直交状態に近くなっている。これは角度基準の識別において好ましい特性である [11]。

### 3.3 多重制約相互部分空間法

これまで一つの制約部分空間を用いる方法について説明してきたが、この拡張として、アンサンブル学習により生成した複数の制約部分空間を用いる方法が提案されている。この方法は各制約部分空間において求まる類似度  $S$  の加重平均を最終的な類似度として識別を行えば良いので実現は容易である。多重制約相互部分空間法と呼ばれるこの方法は、通常の制約相互部分空間法に比べて更に高い識別性能を持つことが実験的に確認されている [23]。

### 3.4 非線形識別への拡張

顔向きや照明変動が大きい場合には、顔パターンの分布は非線形構造を持つ。このような場合には、顔パターンの分布を線形部分空間でうまく表現できず、識別性能が低下する場合がある。これを解決するためにはカーネル関数を用いた非線形主成分分析 [27] の適用が有効である。この枠組みに基づいて、相互部分空間法の非線形識別への拡張である核非線形相互部分空間法が提案されている [24]。同様にカーネル関数を用いて一般化差分部分空間の非線形化も可能であり、これを用いてカーネル非線形制約相互部分空間法 (KCMSM) が実現できる [25, 26]。この方法は線形の制約相互部分空間法に比較して、顔向きや照明条件などの大きな変動に対して頑健であることが評価実験で確認されている。

## 4 顔画像認識の流れ

制約相互部分空間法による物体認識の流れは図 7 に示すように、画像入力、顔パターン切り出し、および制約相互部分空間法による識別から構成される。以下では各処理について説明する。

### 4.1 顔パターン切出し

マルチカメラ [32] や動画画像から得られる複数視点顔パターンを入力画像とする。ただし動画画像の場合には対象人物がシステムに近づくまでの連続画像、あるいはその人物がシステムの前で顔を左右上下に動かしている連続画像を想定している。

まずこの入力画像から部分空間法 [11] を用いて大

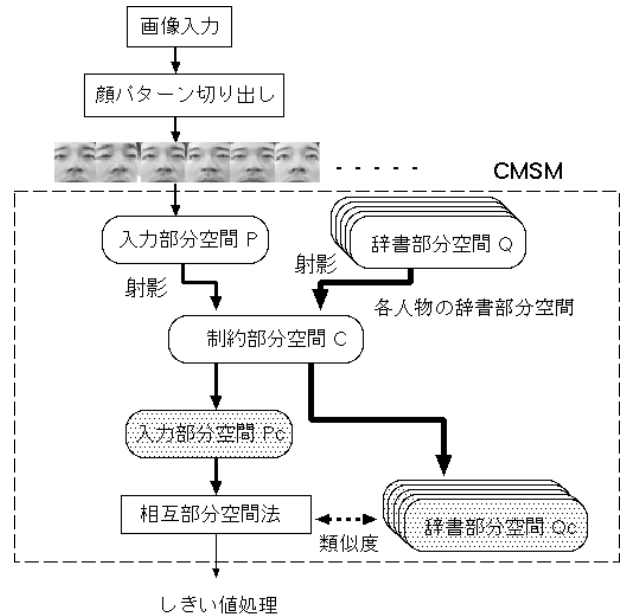


図 7: 制約相互部分空間法による顔識別

きな顔領域を抽出する。この方法では、予め様々な人物の顔パターンを代表する幾つかのテンプレートを用意しておき、このテンプレートを画像全体に渡って移動させながら類似度を逐次求めてゆく。類似度が設定されたしきい値より高い領域を顔領域として検出する。

次に抽出された顔領域から瞳、鼻孔を正確に検出する [28]。まず分離度フィルターを用いて円形部位を顔特徴点候補として抽出する。分離度フィルターは図 8 に示す様な 2 つの同心円領域  $1(r_1-r)$  と領域  $2(r-r_2)$  から成り、領域 1 と 2 の領域情報 (例えば、輝度) の 1.0 に正規化された分離度を出力する。分離度はノイズの影響を受け難く特徴点の明暗差 (領域 1 と 2 の輝度差) に依存しないという特性を持つために、極めて不明瞭な円形特徴でも安定に検出できる。分離度フィルターの半径  $r$  を 3~6 と変化させて出力の最大値をその画素に対する出力値、マスク半径  $r$  を特徴点の半径とする。その後ガウシアン  $\sigma = 1.0$  を掛けて平滑化した後に局所最大点を求め特徴点の候補とする。図 8 はこのようにして求めた特徴点候補を示している。

求められた特徴点 (瞳と鼻孔) の組み合わせに対して、パターン照合による検証を行う。検証のために、各部位の正解辞書と誤り辞書が用意されており、これを用いて求めた類似度の合計が最も高い組み合わせを、正しい組合せとする。最後に、検出された瞳と鼻孔の 4 点を

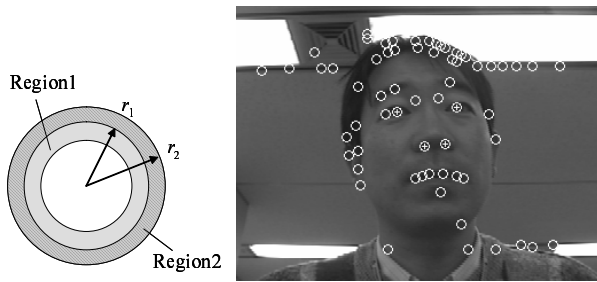


図 8: 円形分離度フィルタと顔特徴点抽出結果



図 9: 抽出された正規化パターンの例

基準とした 2 次元アフィン変換により、顔領域を一定の大きさ、向きに正規化し、図 9 に示すような矩形画像として切り出す。

## 4.2 識別処理

切り出された矩形顔画像に対して、ヒストグラム平坦化、微分処理を施し、更にノルムを 1.0 に正規化する。入力部分空間  $P_{in}$  は一定時間に入力された複数の正規化画像から同時反復法を用いて生成する。この入力部分空間は新しいパターンが入力される度に更新してゆく。次に入力部分空間  $P_{in}$  の制約部分空間への射影  $P_{in}^C$  を求める。ここで入力部分空間  $P_{in}$  の制約部分空間  $C$  への射影  $P_{in}^C$  は以下の手順で求まる。

1. 部分空間  $P$  を張る  $M$  個の基底ベクトルの制約部分空間上への射影ベクトルを求める。
2. 各射影ベクトルの長さを正規化する。
3.  $M$  個の正規化ベクトルに対してグラムシュミットの直交化を施す。
4. 直交化された  $M$  個の正規化ベクトルが射影部分空間  $P_{in}^C$  の基底ベクトルとなる。

表 1: 各方式の識別性能

	SM	EFM	MSM
認識率	71%	75%	80%
分離度	0.09	0.12	0.19
	CMSM-S[1]	CMSM-S[2]	CMSM-S[3]
認識率	99%	99%	100%
分離度	0.55	0.63	0.65

同様の手順で辞書部分空間  $Q$  の制約部分空間  $C$  への射影  $Q^C$  が求まる。辞書部分空間は予め制約部分空間に射影しておけるので計算量の増加は少ない。

射影された入力部分空間  $P_{in}^C$  と辞書部分空間  $Q^C$  の成す正準角を相互部分空間法により求め、これから類似度  $S$  を計算する。全ての辞書部分空間に対して類似度  $S$  を計算して、その中で最も高く、かつしきい値以上の類似度を有する辞書部分空間に該当する人物を本人であると判断する。

## 5 基本性能

表 1 は、部分空間法 (SM)、固有顔法 (FEM)[6]、相互部分空間法 (MSM)、制約相互部分空間法 (CMSM) の識別率と分離度を示している。識別率は本人が 1 位となる率である。分離度は本人類似度の分布と他人に対する類似度分布の分離度合いを示し、1.0 に近い程、識別性能が高いことを意味している。表中の S[1] ~ S[3] は式 (4) で定義した 2 つの部分空間の構造的な類似性を計る類似度である。評価には、25 人に対して照明条件を 8 種類に変化させて収集した顔画像 (15 ピクセル × 15 ピクセル) を用いた。収集の際は顔向きを上下左右に軽く振るように指示した。

評価条件は次の通りである。25 人分のデータ内、12 人分のデータを制約部分空間の学習用として、残りの 13 人分を評価用とした。データ次元数は 215 (縦方向微分処理のために次元が少なくなっている)、入力部分空間と辞書部分空間の次元数は 7 とした。一般化差分部分空間は 13 個 (13 人分) の 40 次元クラス部分空間から生成し、その次元数は予備実験に基づいて 170 とした。

表 1 を見ると、従来の 1 枚の画像のみを使う SM や FEM に比べて、複数のパターンを用いる MSM や CMSM の識別性能が優れていることが分かる。更に MSM と

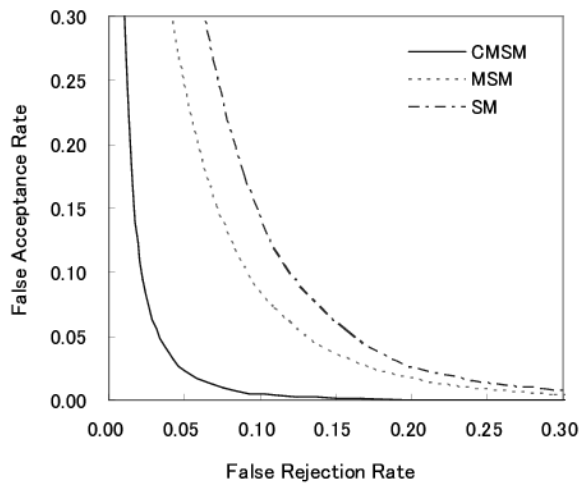


図 10: 評価実験の結果

CMSM を比較すると、識別率、分離度ともに大きく改善されており、制約部分空間への射影効果が極めて高いことが分かる。また CMSM において類似度算出に用いる固有値の個数を増やすことで識別性能、特に分離度が向上している。これは S[3] が S[1] に比べて、より 3 次元形状を反映した類似度となっているからである。

図 10 は、約 14ヶ月に渡る運用データ (登録者 73 人) に対する各方式の ROC (Receiver Operator Characteristic) グラフを示している citeipsj。縦軸は他人受入率 (False Acceptance Rate)、横軸は本人排除率 (False Rejection Rate) であり、グラフが原点に近いほど識別能力が高いことを示している。実運用においても、制約相互部分空間法が他の 2 つの方法と比べて高い識別能力を持っていることが確認できる。

## 6 システム構築

### 6.1 顔照合システム FacePass

セキュリティ応用として、顔照合セキュリティシステム FacePass[29] について紹介する。

図 11 に示す FacePass は、東芝が入室管理向けに開発したシステムで、制約相互部分空間法を照合エンジンとして搭載することで、顔向き、照明条件などの変動に対



図 11: 顔照合セキュリティシステム FacePass

して高い頑健性を実現している。認識性能としては他人受入率 (FAR) が 0.1% 以下、本人排除率 (FRR) が 1% 以下を達成しており、照合速度は約 1 秒である。

FacePass は入室管理をスムーズに行うための様々な機能を備えている。例えば、継続的な運用を行うためには、顔の緩やかな経時変化に対処する必要がある。FacePass にはこれに対処するために自動学習機能が搭載されている。ユーザがシステムを利用する毎に、最新の顔パターンを用いてその人物の辞書パターンが強化される。つまり使えば使う程、識別性能が向上するのである。

更に、最新の FacePass では辞書パターンのネットワーク配信機能が追加されている。ある端末で登録された辞書パターンはネットワーク経由で他の端末に自動配信される。これによりユーザの登録作業は一台の端末で完了し、ユーザの負担軽減が図られている。この他にも、通行履歴を直感的に把握できるインターフェースなどが用意されており、高い操作性も実現している。

### 6.2 画像認識 LSI を用いたハードウェア化

小型で安価な顔照合装置を開発するために、ハードウェア化が不可欠である。ここでは FacePass に搭載された認識アルゴリズムを東芝が開発した画像認識 LSI “Visconti”[30] に実装した例を紹介する。Visconti 顔認識システムは、顔検出と制約相互部分空間法による個人認識を毎秒約 20 枚処理することができ、パーソナルコ

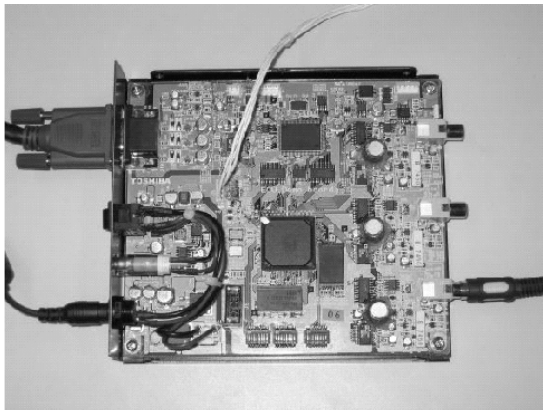


図 12: Visconti 顔認識システム (上: 外観図, 下: 実行画面)

ンピュータ (PC) による顔認識システムと同程度の認識性能を持つ [31]。Visconti はチップ内に画像入出力などのハードウェアを持つため、装置を大幅に小型化、低価格化することができる。図 12 は Visconti の評価用試作ボードであり、サイズは約 160×145mm である。Visconti の平均消費電力は約 1W と極めて少ないため、今後、自動車への搭載や、家庭向けのドアホンや家電ロボット [33] などへの組み込みが期待できる。

### 6.3 マルチカメラによる複数画像の同時入力

2.4 で定義した類似度  $S[n]$  (正準角の個数  $n > 1$ ) が有効となるのは、比較する 2 つの分布が多様なデータを含んでいる場合である。例えばカメラを移動させることで

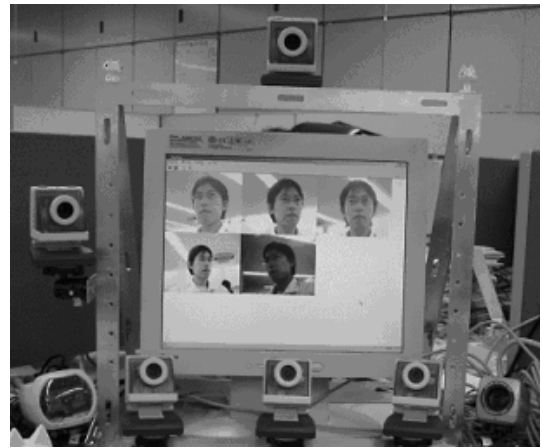


図 13: マルチカメラシステム: 下段に設置された 5 つのカメラからの画像がディスプレイ上に映っている。

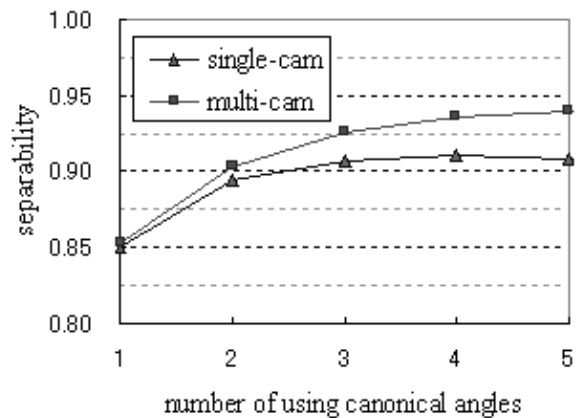


図 14: 実験結果

複数視点からの顔パターンを獲得できる場合や、複数カメラで異なる視点からのパターンを一挙に獲得できる場合 [32] などはこの条件を満足する。

図 13 はこれを確認するために試作したマルチカメラシステムである。図 14 に、このシステムを用いて得られたシングルカメラとマルチカメラの分離度の特性を示す。シングルカメラによる認識では下段中央の 1 台のカメラのみ、マルチカメラの認識では下段の中央に配置された 3 台のカメラを用いて認識を行った。横軸が類似度の算出に用いた正準角の数、縦軸が本人類似度と他人類似度の分離度を示している。被験者は男女合わせて 27 名、画像数は、1 セット各カメラ 100 枚で計 300 枚とし



て撮影した。顔の動かし方については、画面上に移動するマーカに顔を向けるように指示し、個人ごとに顔の動かし方に差がでないように注意した。

最小正準角のみを利用する S[1] では、シングルカメラとマルチカメラの分離性能は同程度であったが、正準角の個数が増えるに従い、両者の分離度は異なる特性を示した。シングルカメラでは S[3] において最良となり、これ以上の改善は見られないが、マルチカメラでは S[3] 以降も向上が見られる。このような差は両者の画像獲得における特性の違いに起因する。シングルカメラではユーザの動きだけに頼っているために、十分に多様な顔を収集することができず、部分空間は 3 次元程度に縮退している。一方、マルチカメラでは多様な顔パターンを確実に収集できるため、3 次元以上の部分空間が安定して生成されていると考えられる。

この結果から分かるように、単一カメラで顔の動きが少ない場合には、パターン分布が小さい次元に縮退するために類似度  $S[n](n > 1)$  は必ずしも有効ではなく、むしろ識別性能の劣化を引き起こす可能性があるため適用には注意が必要となる。

## 7 まとめ

本稿では、まず顔画像認識の概要を述べた後で、動画画像やマルチカメラから得られる複数視点画像を用いた顔認識アルゴリズムについて説明した。そして、このアルゴリズムは制約相互部分空間法と呼ばれるパターン認識により実現できることを示した。システム構築の例として、入室管理システム FacePass について取り上げ、そのシステム構成について概説した。更に画像認識 LSI を用いたハードウェア化や、マルチカメラを用いた画像入力についても述べた。

## 参考文献

- [1] “これでわかったバイオメトリクス,” 日本自動認識協会 (編集), 2001.
- [2] 瀬戸洋一, “サイバーセキュリティにおける生態認証技術,” 共立出版, 2002.
- [3] 赤松 茂, “コンピュータによる顔の認識の研究動向,” 電子情報通信学会誌, vol.80, no.3, pp.257-266, 1997.
- [4] T. Kanade, “Picture processing by computer complex and recognition of human faces,” Technical report, Kyoto University, Dept. of Information Science, 1973.
- [5] L. Sirovich, M. Kirby, “Low-dimensional procedure for the characterization of human faces,” Journal of the Optical Society of America, 4, pp.519-524, 1987.
- [6] M. Turk, A. Pentland, “Face recognition using eigenfaces,” IEEE Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.453-458, 1993.
- [7] P.N. Bellhumer et al, “Eigenface vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.19, no.7, pp.711-720, 1997.
- [8] 金子 正秀, “個人認証技術の最前線,” 映像メディア学会誌 小特集 2-3, Vol.55, No.2, pp.180-184, 2001.2.
- [9] S. Watanabe, N. Pakvasa, “Subspace method of pattern recognition,” Proc. 1st Int. J. Conf. on Pattern Recognition, 1973.
- [10] 飯島 泰蔵, “パターン認識,” 電気・電子工学大系 43, コロナ社, 1973.
- [11] エルッキ・オヤ著, 小川 英光, 佐藤 誠 訳, “パターン認識と部分空間法,” 産業図書, 1986
- [12] 小松 良江, 有木 康雄, “部分空間法を用いた向きによらない顔の切り出しと認識,” 信学技報 PRU95-191, pp.7-14, 1996.
- [13] 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.
- [14] 坂野 鋭, “パターン認識における主成分分析 - 顔画像認識を例として -,” 統計数理 第 49 巻第 1 号, pp.23-pp.42, 2001.
- [15] 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.
- [16] 山口 修, 福井 和広, “顔向き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.

- [17] F. Chatelin, “行列の固有値,” 伊理 正夫, 伊理 由実訳, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1993.
- [18] 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, 2003.
- [19] 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 - 照明変動を抑える制約部分空間の学習 -,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J82-D-II, no.4, pp.613–620, 1999.
- [20] 福井 和広, “部分空間表現に基づく顔認識,” 信学技法 PRMU2002-206, pp.33–40, 2003.
- [21] 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,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J87-D-II, no.8, pp.1622–1631, 2004.
- [22] 前田 賢一, 山口 修, 福井 和広, “部分空間の正準角による3次元パターンのマッチング法,” CVIM145-18, 2004.
- [23] 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,” MIRU2004, pp.529–534, 2004.
- [24] 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,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J84-D, No.8, pp.1549–1556, 2001.
- [25] 福井 和広, “カーネル差分部分空間に基づく非線形特徴抽出,” 第6回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2003), 2003.
- [26] 福井 和広, 山口 修, “部分空間法の理論拡張と物体認識への応用,” 信学技法 PRMU2004-82, pp.49–58, 2004.
- [27] B. Schölkopf, A. Smola, and K.-R. Müller, “Nonlinear principal component analysis as a kernel eigenvalue problem,” Neural Computation, Vol. 10, pp.1299–1319, 1998.
- [28] 福井 和広, 山口 修, “形状抽出とパターン照合の組合せによる顔特徴点抽出,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J80-D-II, no.8, pp.2170–2177, 1997.
- [29] 顔照合セキュリティシステム FacePass, <http://www3.toshiba.co.jp/snis/scd/fps/>
- [30] J. Tanabe, Y. Taniguchi, T. Miyamori, Y. Miyamoto, H. Takeda, M. Tarui, H. Nakayama, N. Takeda, K. Maeda and M. Matsui, “Visconti: Multi-VLIW Image Recognition Processor based on Configurable Processor,” Proc. of CICC, pp. 185–188, 2003.
- [31] T. Kozakaya, H. Nakai, “Development of a Face Recognition System on an Image Processing LSI Chip”, 2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW’04) Volume 5, 2004.
- [32] 小坂谷 達夫, 山口 修, 福井 和広, “マルチカメラを用いた顔画像認識システム,” 第8回画像センシングシンポジウム, pp.319–324, 2002.
- [33] 鈴木 薫, 吉見 卓, 山本 大介, 廣川 潤子, 小川 秀樹, 松日楽 信人, “視聴覚連携によるホームロボットの「呼べば来る」機能の実現,” 第4回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 (SI2003), pp.576–577, 2003.