

广义 DKL 变换及其在人脸识别中的应用研究*

吴小俊^{1,2,3} 杨静宇² 王士同^{1,2} 刘同明¹

(华东船舶工业学院电子与信息系 镇江212003)¹ (南京理工大学信息学院 南京210094)²

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳110015)³

The Generalized DKL Transform and it's Application on Face Image Recognition

WU Xiao-Jun^{1,2,3} YANG Jing-Yu² WANG Shi-Tong^{1,2} LIU Tong-Ming¹

(Dept. of Electron and Imformation, East China Institute of Ship Technology, Zhenjiang 212003)¹

(College of Imformation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)²

(Shenyang Institution of Automatic, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)³

Abstract A study has been made on the solving method of optimal set of uncorrelated discriminant vectors in this paper. A new concise formula for solving the optimal set of uncorrelated discriminant vectors has been proposed. The generalized discriminant KL transform is proposed based on the new formula, which is applied in the feature extraction of facial images. The numerical experiments on facial database of ORL show the effectiveness of the proposed method.

Keywords Pattern recognition, Feature extraction, Discriminant analysis, Face recognition

1 引言

在模式识别领域中, Fisher 线性判别方法有着重大的影响,其基本思想是在 Fisher 鉴别准则函数取极值的条件下,求得一个最佳鉴别方向,然后再将模式高维特征向量投影到该最佳鉴别方向上,构成一维鉴别特征空间,于是模式鉴别分析就在一维空间中进行^[1~15]。

Foley 和 Sammon 在1970年发展了 Fisher 线性判别方法,提出了 Sammon 最佳鉴别平面的技术,并将它用于解决两类问题^[2]。Sammon 最佳鉴别平面的技术在模式识别领域中得到广泛的应用与发展, Duchene 和 Leclercq 给出了对多类问题的 Foley-Sammon 最佳鉴别矢量集的计算公式^[3], Longstaff 提出了分别基于 Fukunaga-Koontz 变换和基于矢径(Radius Vector)的最佳鉴别平面, Turk 和 Pentland 提出了特征脸的方法^[1], Hong 和 Yang 提出了基于 SVD 的特征抽取方法^[4,5], Cheng 和 Yang 提出了一种新的相似鉴别准则^[7], Liu 提出了广义最佳鉴别平面和广义最佳鉴别矢量集的一系列方法^[8,9], 郭提出了广义最佳鉴别矢量的改进算法^[10~12], 我们最近又提出了广义最佳鉴别矢量集的解析算法^[13]。在实际问题模式原始特征的维数一般比较高,特征分量可能是相关的,为此,金忠提出了一种具有统计不相关性的最佳鉴别平面和统计不相关最佳鉴别矢量集的算法^[14~15]。本文在统计不相关最佳鉴别矢量集的一种新算法的基础上提出广义 DKL 变换,并将其应用于人脸图像的特征抽取和识别问题的研究。

2 统计不相关最佳鉴别矢量集

设 w_1, w_2, \dots, w_m 为 m 个模式类, $X = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, N$

为 n 维训练样本集, X 中的每一个 x_i 属于 w_i 类, 即 $x_i \in w_i, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, m$ 。设 w_i 类的平均矢量、协方差矩阵与先验概率分别为 $m_i, c_i, P(w_i)$, 类间散布矩阵、类内散布矩阵和总散布矩阵分别为 S_b, S_w, S_t 。

Fisher 鉴别函数可定义为:

$$J(\varphi) = \frac{\varphi^T S_b \varphi}{\varphi^T S_w \varphi} \quad (1)$$

其中, φ 为任一 n 维列矢量。使函数 $J(\varphi)$ 达到最大值的矢量 φ^* 为 Fisher 最佳鉴别方向, 训练样本在方向 φ^* 上的投影集在一维子空间 $Span\{\varphi^*\}$ 中有最小的类内距离和最大的类间距离。

设 $\varphi = \varphi^* / \|\varphi^*\|$, 则 φ 是 Foley-Sammon 最佳鉴别矢量集的第一个矢量, Foley-Sammon 最佳鉴别矢量集的第 i 个鉴别矢量 $\varphi_i (1 < i \leq r)$ 可以由解下列问题计算得到:

$$\begin{aligned} \max_{\varphi_i} (J(\varphi_i)) \\ \varphi_i^T \varphi_i = 0 \\ |\varphi_i| = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

设 $S = \{\varphi_i\}_{i=1,2,\dots,r}$ 。由 Foley-Sammon 最佳鉴别矢量集可以构成线性变换

$$y = \Phi^T x \quad (3)$$

其中 $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r)$ 。当 $r = 2$ 时, Foley-Sammon 最佳鉴别矢量集等价于 Sammon 最佳鉴别平面。

首先求出 Fisher 最佳鉴别方向 φ_1 。在求出 $r (r \geq 1)$ 个最佳鉴别方向 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r$ 后, 第 $r+1$ 个最佳鉴别方向在满足共轭正交条件(4)式下的使 Fisher 鉴别准则函数(1)式取到最大值的向量 φ_{r+1} :

$$\varphi_{r+1}^T S_i \varphi_i = 0 (i = 1, 2, \dots, r) \quad (4)$$

引理1^[14,15] 具有统计不相关性的最佳鉴别矢量集的任意两个分量 y_i 和 y_j 是统计不相关的。

* 本课题得到国家自然科学基金课题(编号:60072034)、中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室基金课题(编号:RL200108)和江苏省高校自然科学研究计划项目(编号:01KJB52002)的资助。吴小俊 博士,副教授,主要从事神经网络、模式识别和人工智能的研究。杨静宇 教授,博导,主要研究领域为计算机视觉、信息融合、模式识别和智能机器人等。王士同 教授,博导,主要从事神经网络、模糊系统和模糊人工智能的研究。刘同明 教授,主要从事信息融合、数据挖掘和模式识别等方面的研究。

关于具有统计不相关性的最佳鉴别方向的求解有如下的定理:

引理2^[14,15] 具有统计不相关性的最佳鉴别矢量集的第 $r+1$ 个最佳鉴别方向 φ_{r+1} 是下列广义本征方程中最大的本征值对应的本征向量:

$$PS_s\varphi_{r+1} = \lambda S_\omega\varphi_{r+1} \quad (5)$$

式中: $P = I - S_s D^T (D S_s S_\omega^{-1} S_s D^T)^{-1} D S_s S_\omega^{-1}$ 这里, I 为单位矩阵, 而且

$$D = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_r]^T = \begin{bmatrix} \varphi_1^T \\ \varphi_2^T \\ \vdots \\ \varphi_r^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 一种新的统计不相关最佳鉴别矢量集算法

引理3^[8,9] $F(\phi) = \frac{\phi^T S_s \phi}{\phi^T S_s \phi}$ 和 $F(\varphi) = \frac{\varphi^T S_s \varphi}{\varphi^T S_\omega \varphi}$ 等价。

定理1 具有统计不相关的最佳鉴别矢量集的第 $r+1$ 个最佳鉴别矢量 φ_{r+1} 是下列广义方程中最大的本征值对应的本征向量。

$$(I - S_s D^T D) S_s \varphi_{r+1} = \lambda S_s \varphi_{r+1} \quad (7)$$

证明: 所求的最佳鉴别矢量应是归一化的, 即 $\varphi_{r+1}^T \varphi_{r+1} = 1$ 先让 φ_{r+1} 满足如下条件

$$\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1} = 1 \quad (8)$$

由 Lagrange 乘子法, 问题等价于求 φ_{r+1} 使下述函数取得最大值:

$$L(\varphi_{r+1}) = \frac{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}}{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}} - \sum_{i=1}^r u_i \varphi_{r+1}^T S_s \varphi_i - \eta (\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1} - 1)$$

对 φ_{r+1} 求偏导并令其等于0, 得:

$$\frac{2S_s \varphi_{r+1}}{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}} - \frac{2S_s \varphi_{r+1}}{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}} * \frac{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}}{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}} - \sum_{i=1}^r u_i S_s \varphi_i - \eta S_s \varphi_{r+1} = 0$$

在上式两边同时左乘 $\varphi_j^T, j=1, 2, \dots, r$. 由于统计不相关性, 则第二项和第四项为零, 整理得: $\frac{2\varphi_j^T S_s \varphi_{r+1}}{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}} - u_j = 0$, 即:

$$u = 2DS_s\varphi_{r+1}$$

令 $\lambda = \frac{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}}{\varphi_{r+1}^T S_s \varphi_{r+1}}$, 将 u 代入原式整理得:

$$2S_s\varphi_{r+1} - 2\lambda S_s\varphi_{r+1} - S_s D^T * 2DS_s\varphi_{r+1} = 0$$

即: $(I - S_s D^T D) S_s \varphi_{r+1} = \lambda S_s \varphi_{r+1}$. 故该定理得证。

4 广义 DKL 变换

KL 变换是在最小均方误差准则意义下获得数据压缩的最佳变换。KL 变换的产生矩阵可以是总体相关矩阵、总体散布矩阵、类间散布矩阵。若 KL 变换的产生矩阵是类内散布矩阵, 则这样的 KL 变换称为广义 KL 变换。由 KL 变换投影得到的特征空间称为最佳表示特征矢量 (MEF); 由最佳鉴别变换投影得到的特征空间称为最佳鉴别特征矢量 (MDF)。

在上述统计不相关最佳鉴别矢量的求解过程中, 若总体散布矩阵为奇异时, 其求解过程变得非常困难。而当训练样本数目小于样本矢量的维数时, 就会发生这种情况。文[16]提出了 DKL 方法解决上述问题。

定义1 DKL 变换是 $Z = W'V'X$, 其中, V 是从图像空间到 MEF 空间的投影变换矩阵, W 是从 MEF 空间到 MDF 空间的投影变换矩阵。

若 V 的产生是由广义 KL 变换得到的, 则称相应的 DKL 变换为广义 DKL 变换。

我们可以通过选择广义 KL 变换的压缩维数, 使得在 MDF 空间中总体散布矩阵总是非奇异的, 因此我们在 MDF 空间中利用统计不相关最佳鉴别矢量集的计算公式, 可以抽取图像的特征。一般地, 我们用广义 KL 变换将特征维数压缩到 $c-1$ (c 代表类别数目)。

5 人脸识别实验与结果分析

为了验证本文所提出的方法的有效性, 我们从 ORL 人脸图像库中分别取出8个、19个、30个、39个人的脸部图像 (92×112), 每个人10幅图像。计算中, 我们取每人的4幅图像训练, 其余6幅图像作为检验样本。我们分别用文[8]、文[9]和本文的方法抽取最佳鉴别矢量, 并在鉴别矢量空间构造最小距离分类器进行分类。图1为用于实验的部分人脸图像, 表1为两种老算法的实验结果比较, 表2是本文方法的实验结果。从表1、表2可见本文的方法比老方法的结果要好, 因本文的方法先作广义 KL 变换将特征维数压缩到 $c-1$ (c 代表类别数目), 所以统计不相关最佳鉴别矢量是在低维空间中得到的, 故本文方法的计算复杂性要小得多。



图1 ORL 图像库部分图像

表1 两种老算法的性能

类数	鉴别矢量数	训练样本数	错误识别数	
			文[8]的方法	文[9]的方法
4	2	4	0	0
4	3	4	0	0
5	3	4	0	6
5	4	4	0	6
6	5	4	0	5
7	6	4	1	8
8	7	4	3	20
9	8	4	3	6
10	9	4	5	16

表2 本文方法的实验结果

类数	鉴别矢量数	训练样本数	错误识别数
2	1	3	0
2	1	4	0
3	2	3	0
3	2	4	0
4	3	3	0
4	3	4	0
5	4	3	0
5	4	4	0
6	5	3	0
6	5	4	0
7	6	4	0
8	7	3	0
9	8	3	1
9	8	4	1
10	9	3	3
11	10	4	1

结论 本文对统计不相关最佳鉴别矢量集的求解方法进行的研究,获得如下结论:

(1)本文提出了一种新的统计不相关最佳鉴别矢量的求解方法。

(2)本文提出的广义DKL变换较成功地解决了人脸识别中的小样本问题,并且特征抽取和识别速度较快。

(3)在ORL人脸数据库的数值实验验证了本文方法的有效性。

(4)新方法不仅对人脸的特征提取有效,而且对手写体数字识别、汉字识别以及基于内容的检索等模式识别领域的研究都有一定的意义。

(上接第123页)

制描述了系统安全的要求。

参考文献

- Bell D, Padula L. Secure computer systems: unified exposition and MULTICS. [Report ESD-TR-75-306]. The MITRE Corporation, Bedford, Massachusetts, March 1976
- Clark D, Wilson D. A comparison of commercial and military computer security policies. In: proc. of the Symp. on Security and

(5)在实验中我们发现,当类别数目比较小时识别率均为100%,但当类别数目较大时仍然要保持高识别率,还有待于进一步的研究,作者正在致力于这一问题的研究。

参考文献

- Turk M, Pentland A. Eigenfaces for face recognition. J. Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 71~86
- Foley D H, Sammon J W. An optimal set of discriminant vectors. IEEE Trans. Computers, 1975, 24(3): 281~289
- Duchene J, Leclercq S. An optimal transformation for discriminant and principal component analysis. IEEE Trans. PAMI, 1988, 10(6): 978~983
- Hong Z Q. Algebraic feature extraction of image for recognition. Pattern Recognition, 1991, 24(3): 211~219
- 洪子泉, 杨静宇. 用于图像识别的图像代数特征抽取. 自动化学报, 1992, 18(2): 232~238
- 洪子泉, 杨静宇. 基于奇异值特征和统计模型的人像识别算法. 计算机研究与发展, 1994, 31(3): 60~65
- Cheng Y Q, Yang J Y, et al. A novel feature extraction method for image recognition based on similar discriminant function. Pattern Recognition, 1993, 26(1): 115~125
- Liu K, Yang J Y, et al. An efficient algorithm for Foley-Sammon optimal set of discriminant vectors by algebraic method. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1992, 6(5): 817~829
- Liu K, Yang J Y, et al. A generalized optimal set of discriminant vectors. Pattern Recognition, 1992, 25(7): 731~739
- 郭跃飞, 杨静宇. 求解广义最佳鉴别矢量的一种迭代算法及人脸识别. 计算机学报, 2000, 23(11)
- 郭跃飞. 人脸图像代数特征提取与最佳鉴别矢量的研究. [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2000
- Guo Yue-Fei, Yang Jing-Yu, et al. Feature Extraction Method Based on the Generalized Fisher Discriminant Criterion and Facial Recognition. Pattern Analysis & Application, 2001, 4(1): 61~66
- 吴小俊, 杨静宇, 王士同, 等. A new algorithm for solving optimal discriminant vectors. Journal of Computer Science and Technology, 2002, 17(3): 324~330
- 金忠. 人脸图像特征抽取与维数研究. [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 1999
- 金忠, 杨静宇. 一种具有统计不相关性的最佳鉴别矢量集. 计算机学报, 2000
- Swets D L, John (Juyang) Weng. Using discriminant eigenfeatures for image retrieval. IEEE Trans. PAMI, 1996, 18(8)

Privacy, IEEE Press, 1987. 184~194

- Sandhu R, Coyne E, Feinstein H, Youman C. Role-based access control models. IEEE Computer, 1996, 29(2)
- Ferraiolo D F, Sandhu R. Proposed NIST Standard for Role-Based Access Control. ACM Transactions on Information and Systems Security, 2001, 4(3)
- Ahn G, Sandhu R. Role-Based Authorization Constraints Specification. ACM Transactions on Information and System Security, 2000, 3(4)