

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23020081153219

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于流形学习的人脸识别
若干关键技术研究

Research on Several Key Technical Problems in Face
Recognition Based on Manifold Learning

刘 碧 霞

指导教师姓名: 李 绍 滋 教授

专 业 名 称: 计算机科学与技术

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2011 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

人脸识别作为生物特征识别的主流技术之一，是国内外研究和应用的热点。主流的人脸识别技术对光照、姿态等由于非理想采集条件或者用户不配合造成的变化鲁棒性较差。流形学习是近年来机器学习及模式识别等领域的研究热点。人脸从某种意义上来说是一种典型的流形结构，人脸数据集是由某些内在变量控制形成的非线性流形。因此，基于流形学习的人脸识别研究近年来引起了人们的广泛关注，成为该领域的热门研究课题。

本文通过仿真实验，系统分析主流线性和非线性流形学习算法在人脸识别中应用的可行性，优势及存在的问题。针对流形学习在人脸识别应用中的本征维数估计问题、测试数据的 out-of-sample 问题、无监督学习问题以及人脸识别技术中的光照问题和活体检测问题开展工作，其主要研究工作及创新点包含以下三个部分：

1、提出监督局部线性判别嵌入 (Supervised Locally Linear Discriminant Embedding, SLLDE) 算法，相对于局部线性嵌入算法，该方法有以下三点改进：

- 1) SLLDE 是局部线性嵌入算法的线性近似，它借鉴线性判别分析的思想，在目标函数中引入了类内散度度量和类间散度度量，使得同类样本点分布尽可能密集，并且不同类的样本点分离，解决了测试数据的 out-of-sample 问题。
- 2) 对于局部线性嵌入算法，本征维数是一个需要估计的未知量。针对该问题，本文提出基于局部线性判别分析的最优判别维数估计算法。该方法是基于局部主成分分析方法的改进，对数据的局部子集进行线性判别分析。
- 3) 原始 LLE 算法是无监督学习算法，没有利用到样本的标签信息。SLLDE 算法结合样本本身的流形结构信息和标签信息调整样本点之间的距离，使用调整后的距离矩阵来实现线性近邻重构。

2、将胡^[75]等人提出的基于先验知识的自动白平衡算法，应用于人脸识别光照预处理。光照问题是人脸识别技术的瓶颈，基于图像处理技术的光照预处理方法以其简单有效性在实际应用中得到了广泛的重视。

3、提出一种结合傅立叶频谱分析和眨眼检测的反照片欺骗活体人脸判断方

法。在人脸识别应用中，合法用户的人脸图片、视频以及三维模型等常被用于身份伪造，而其中照片是最常见的欺骗方式。

在 ORL 人脸数据库、Yale 人脸数据库和 IMT 人脸数据库上的实验结果验证了本文提出的 SLLDE 算法，基于自动白平衡的光照预处理方法以及结合傅立叶频谱分析和眨眼检测的反照片欺骗活体人脸判断方法在人脸识别应用中的有效性。

关键词：流形学习 人脸识别 维数约减 监督流形学习 白平衡 活体检测

Abstract

As a dominant technology of Biometric Verification Technologies, human face recognition has become a hot research and application topic both at home and abroad. However, due to the complexity of human face structure, the diversity of illumination, face pose and facial expression, face recognition technology is universally considered a challenging study topic. In recent years, manifold learning has become a hot study topic in the field of artificial and pattern recognition. It is commonly accepted that human face is a manifold structure and face dataset is a non-linear manifold formed by some inner variable. Face recognition based on manifold learning has attracted more and more attention.

In this paper, the feasibility, advantages and deficiency of mainstream linear and non-linear manifold learning algorithms are studied systematically through experiments. We focus on the intrinsic dimensionality estimation problem, out-of-sample problem, non-supervised learning problem, illumination problem and live detection problem in face recognition. The major research work and innovations include the following four aspects:

1. Aiming at the application problem of locally linear embedding (LLE) algorithm in face recognition, we propose a novel face recognition technology based on supervised locally linear embedding (SLLDE) algorithm. Compared to locally linear embedding algorithm, there are three following improvements:

- 1) LLE doesn't establish the mapping between high-dimensional manifold space and low-dimensional embedding space. For a new test sample, it is impossible to directly obtain the mapping of the given sample in low-dimensional embedding space. Inspired by the principle of linear discriminant, within-class scatter and between-class scatter are integrated into the objective function to preserve the discriminant local structure of subspace. It emphasize the discriminant information of samples to make within-class samples closer and between-class samples further.
- 2) Intrinsic dimensionality is an unknown parameter in LLE. To address the problem, we propose an optimal dimensionality estimation approach based on locally linear discriminant analysis. It is the improvement based on local PCA.
- 3) LLE is an unsupervised learning algorithm and don't make full use of sample

information. SLLDE integrates the manifold structure and label information of samples, and rebuild linear neighbourhood with adjusted distance matrix.

2. Illumination is the bottleneck of face recognition technology. The image-based illumination preprocessing approaches in face recognition receive widespread attention because of simpleness and efficiency. A new automatic white balance algorithm based on prior information is presented and is used as the illumination preprocessing of face recognition.

3. Face recognition system is often intruded by face images, videos and 3D models of valid users. We propose an anti-photo spoof approach based on the analysis of Fourier spectra and eye blinking detection.

Experiments on ORL, Yale and IMT face databases demonstrated the efficiency of the proposed SLLDE algorithm, illumination preprocessing method based on automatic white balance, and the anti-photo spoof approach based on the analysis of Fourier spectra and eye blinking detection in face recognition.

Key Words: Manifold Learning; Face Recognition; Dimensionality Reduction; Supervised Manifold Learning; White Balance; Live Detection

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 课题背景及意义.....	1
1.2 人脸识别.....	2
1.2.1 人脸识别的发展历程及应用现状.....	2
1.2.2 人脸特征算子.....	7
1.3 论文的主要研究工作及创新点.....	13
1.4 论文的组织结构.....	15
第二章 基于流形学习的人脸识别问题.....	17
2.1 流形学习.....	17
2.1.1 流形的概念.....	17
2.1.2 流形学习问题.....	19
2.2 流形学习与维数约简.....	20
2.3 线性流形学习算法比较研究.....	21
2.3.1 主成分分析(PCA).....	21
2.3.2 线性判别分析(LDA).....	22
2.3.3 局部保距投影(LPP).....	24
2.3.4 算法仿真实验及分析比较.....	25
2.4 非线性流形学习算法比较研究.....	29
2.4.1 等距映射(Isomap).....	29
2.4.2 局部线性嵌入算法(LLE).....	30
2.4.3 拉普拉斯特征映射(LE).....	33
2.4.4 算法仿真实验及分析比较.....	34
第三章 基于监督局部线性判别嵌入的人脸识别算法研究.....	37

3.1 局部线性嵌入算法在人脸识别应用中的问题.....	37
3.2 局部线性判别嵌入.....	38
3.2.1 LLE 测试数据的 out-of-sample 问题.....	38
3.2.2 保持近邻嵌入(NPE).....	39
3.2.3 局部线性判别嵌入(LLDE).....	40
3.3 基于局部线性判别分析的最优判别维数估计.....	42
3.3.1 本征维数估计问题.....	42
3.3.2 本征维数估计方法.....	43
3.3.3 基于局部线性判别分析的最优判别维数估计.....	46
3.4 基于监督局部线性判别嵌入的人脸识别算法.....	48
3.4.1 监督局部线性嵌入(SLLE).....	48
3.4.2 监督局部线性判别嵌入(SLLDE).....	50
3.4.3 实验结果及分析.....	53
3.5 本章小结.....	56
第四章 人脸识别技术中的光照问题和活体检测问题研究.....	59
4.1 基于自动白平衡的光照预处理方法.....	59
4.1.1 人脸识别中光照问题研究概述及处理方法.....	59
4.1.2 基于图像处理技术的人脸识别光照预处理方法.....	62
4.1.3 基于先验知识的自动白平衡算法.....	65
4.2 基于傅立叶频谱分析和眨眼检测的活体人脸判断算法.....	69
4.2.1 人脸识别中的活体检测问题及方法.....	69
4.2.2 基于傅立叶频谱分析和眨眼检测的活体人脸判断算法.....	71
4.3 本章小结.....	73
第五章 总结及展望.....	75
5.1 研究工作总结.....	75
5.2 工作展望.....	76
参 考 文 献.....	77
附录 攻读硕士期间发表的论文.....	85
致 谢.....	87

Table of Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English.....	III
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Research Background and Significance.....	1
1.2 Face Recognition.....	2
1.2.1 Face Recognition Development and Application Status.....	2
1.2.2 Face Feature Operator.....	7
1.3 Main Work and Innovations of This Paper.....	13
1.4 Structure of This Paper.....	15
Chapter 2 Face Recognition Based on Manifold Learning.....	17
2.1 Manifold Learning.....	17
2.1.1 Manifold Conception.....	17
2.1.2 Manifold Learning Problem.....	19
2.2 Manifold Learning and Dimensionality Reduction.....	20
2.3 Linear Manifold Learning Comparative Study.....	21
2.3.1 Principal Component Analysis(PCA).....	21
2.3.2 Linear Discriminant Analysis(LDA).....	22
2.3.3 Locality Preserving Projection(LPP).....	24
2.3.4 Experimental Results and Analysis.....	25
2.4 Non-Linear Manifold Learning Comparative Study.....	29
2.4.1 Isometric Mapping(Isomap).....	29
2.4.2 Locally Linear Embedding(LLE).....	30
2.4.3 Laplacian Eigenmap(LE).....	33
2.4.4 Experimental Results and Analysis.....	34
Chapter 3 Face Recognition Based on SLLDE.....	37
3.1 Application Problems of Locally Linear Embedding.....	37
3.2 Locally Linear Discriminant Embedding(LLDE).....	38

3.2.1 Out-of-Sample Problem of Test Sample in LLE.....	38
3.2.2 Neighborhood Preserving Embedding(NPE).....	39
3.2.3 Locally Linear Discriminant Embedding.....	40
3.3 Optimal Discriminant Dimensionality Estimation Based on Local LDA...	42
3.3.1 Intrinsic Dimensionality Estimation Problem.....	42
3.3.2 Intrinsic Dimensionality Estimation Approachs.....	43
3.3.3 Optimal Discriminant Dimensionality Estimation Based on Local LDA...	46
3.4 Face Recognition Based on SLLDE.....	48
3.4.1 Supervised Locally Linear Embedding(SLLE).....	48
3.4.2 Supervised Locally Linear Discriminant Embedding(SLLDE).....	50
3.4.3 Experimental Results and Analysis.....	53
3.5 Conclusion.....	56
Chapter 4 Research on Key Problems in Face Recognition.....	59
4.1 Illumination Preprocessing Based on Auto White Balance.....	59
4.1.1 Illumination Problems and Approaches Overview in Face Recognition....	59
4.1.2 Image-Based Illumination Preprocessing Methods in Face Recognition...	62
4.1.3 Auto White Balance Based on Prior Information.....	65
4.2 Live Detection Approach Based on Fourier Spectra and Eye-Blinking.....	69
4.2.1 Live Detection and Approaches in Face Recognition.....	69
4.2.2 Live Detection Approach Based on Fourier Spectra and Eye-Blinking.....	71
4.3 Conclusion.....	73
Chapter 5 Conclusion and Future Work.....	75
5.1 Conclusion.....	75
5.2 Future Work.....	76
References.....	77
Appendix: My Published Papers.....	85
Acknowledgements.....	86

第一章 绪论

随着计算机技术的飞速发展，现代社会对于身份识别的准确性、安全性与实用性提出了更高的要求，传统的身份识别方法，例如：密码、IC卡、ATM卡等，已经不能很好地满足这种要求，因而生物特征识别技术则应运而生。同时，国家公共安全、信息安全等关系国计民生的领域更需要高可靠性、高安全性的全新身份验证技术，尤其是美国遭遇“911”恐怖袭击事件之后，安全问题更加成为人们关注的热点问题。智能人脸识别系统是基于生物统计学的计算机生物特征识别技术，它将成为21世纪身份认证的发展趋势。用计算机对人脸特征进行识别的突出特点有：人脸特征信息不容易被伪造；利用人脸特征进行身份验证在应用上非常方便，不需要其他任何辅助设备；人脸资料的搜集不需要被拍摄对象的配合，可方便获取；只需要普通的PC硬件和相应软件，配置方便，性价比高。人脸识别是一项具有很高的理论和应用价值的研究课题，并且日益受到人们的广泛关注，成为模式识别领域的研究热点。

1.1 课题背景及意义

人脸识别是一个让计算机自动识别人脸的问题，可以粗略定义如下：输入一个场景的静止图像或则视频序列，从事先给定的数据库中，识别或者验证这个场景中的一个或多个人的身份。一个典型的自动人脸识别系统一般包括四个处理部分：人脸检测和定位、人脸对齐、人脸特征提取和人脸分类。

人脸识别是一个非常活跃的研究课题。它涉及的研究领域包括模式识别、计算机视觉、人工智能、图像处理、心理学、生理学和认知科学等，与计算机人机交互领域和基于其它生物特征的身份识别方法都有密切联系。目前，尽管在这方面的研究已经取得令人鼓舞的进展，但是人脸识别技术在实际应用中仍面临着严峻的挑战。尽管不同个体的人脸各不相同，但人类的面孔总体是相似的；人脸是有极强可塑性的三维柔性皮肤表面，人脸特征会随着表情、年龄、化妆乃至整容、意外伤害等发生变化。另外，图像采集受各种外界条件如光照、视角、距离

等变化因素的影响很大，尤其是在用户不配合、非理想采集条件下。这诸多因素使得人脸识别成为一项极富挑战性的研究课题。如何能正确识别大量的人脸，并满足实时性要求是迫切需要解决的问题。

受光照和姿态影响的人脸序列图像是一种典型的海量高维数据，计算机自动识别相当困难，但是，人脑却能在瞬间识别同一个人在光照、姿态等变化后的身份。一般认为是大脑自然的感知了人脸高维数据的内在低维结构，这种感知以流形方式存在^[1]，人脑从流形中掌握了影响人脸变化的光照、表情和姿态等因素的控制变量，使识别问题得到了简化，进而能在瞬间完成识别问题。

神经生物学研究表明，光照或视角的不同引起刺激图像发生微小的变化时，视觉感知系统的响应具有某种特性的不变性。神经生理学和心理学理论认为连续变化的信号本身蕴涵了这种不变性。神经心理学研究还发现整个神经细胞群的触发率可以由少量的变量组成的函数描述，如眼的角度和头的方向，这表明神经元的群体活动性是由其内在的低维结构所控制。人脸从某种意义上来说是一种典型的流形结构，人脸数据集是由某些内在变量控制形成的非线性流形。要完成有效的人脸识别，“人脸流形”是个不错的模型。我们认为正是光照、表情和姿态的变化引起人脸在观测空间中呈现较大的曲率分布，只要能从“人脸流形”中寻找出光照、表情和姿态等控制变量，就能大幅降低观测空间中的维数。

流形学习是一个具有基础性和前瞻性的研究方向，已经成为近年来机器学习和数据挖掘领域的研究热点。尽管关于流形学习、流形学习算法和应用的研究取得了许多有用的成果，但由于其数学基础较为复杂以及多学科交叉、融合等原因，无论是基于流形学习算法的理论研究，还是其应用研究仍然存在很多值得进一步探讨的问题，这也正是本文的研究动机所在。

1.2 人脸识别

1.2.1 人脸识别的发展历程及应用现状

人脸识别技术作为生物特征识别技术的主流技术之一，是国内外研究和应用的热点。人脸识别的研究历史是比较悠久的，Galton早在1888年和1910年就分别在《Nature》杂志发表了两篇关于利用人脸进行身份识别的文章，对人类自身的人脸识别能力进行了分析。1965年Chan & Bledsoe在Panormic Research Inc.发表

的技术报告^[24]是最早的关于人脸自动识别的研究论文，到现已有40多年的历史。Kanada博士于1973年在京都大学完成了第一篇关于人脸自动识别的博士论文^[25]。直到现在，作为卡内基-梅隆（CMU）大学机器人研究院的一名教授，Kanada教授仍然是人脸识别领域的活跃人物之一。麻省理工学院的Turk和Pentland提出的“Eigenface”方法^[26]是最负盛名的人脸识别方法之一，它也成为人脸识别性能测试基准算法。麻省理工学院AI实验室的Brunelli和Poggio于1992年对比了基于结构特征的方法与基于模板匹配的方法的知识性能，并给出一个比较确定的结论：模板匹配的方法优于基于特征的方法^[27]。这一导向性结论与Eigenface很大程度上促进了基于表观（Appearance-based）的线形字空间建模和基于统计模式识别技术的人脸识别方法的发展，他们也逐渐成为主流的人脸识别技术。

Belhumerur等提出的Fisherface^[28]方法首先采用主成分分析（Principal Component Analysis, PCA, 亦即Eigenface）对图像表观特征进行降维，在此基础上，采用线形判别分析（Linear Discriminant Analysis, LDA）的方法变换降维后的主成分以期获得“尽量大的类间散度和尽量小的类内散度”。该方法还产生了很多不同的变种。MIT的Moghaddam^[29]在Eigenface的基础上，提出了基于双子空间进行贝叶斯概率估计的人脸识别方法，该方法通过“作差法”，将两幅人脸图像对的相似度计算问题转化为一个两类（类内差和类间差）分类问题，类内差和类间差数据都要首先通过主成分分析（PCA）技术进行降维，计算两个类别的类条件概率密度，最后通过贝叶斯决策（最大似然或者最大后验概率）的方法进行人脸识别。此外还有弹性图匹配技术（Elastic Graph Matching, EGM）^[30]。此外，美国军方还组织了著名的FERET人脸识别算法测试^[31]，并出现了若干商业化运作的人脸识别系统，如著名的FaceIt系统。柔性模型（Flexible Models）包括主动形状模型^[32]和主动外观模型^[33]是人脸建模方面的一个重大贡献。

主流的人脸识别技术对光照、姿态等由于非理想采集条件或者用户不配合造成的变化鲁棒性较差。因此，光照、姿态问题逐渐成为研究热点。Georghiades^[34]等人提出了基于光照锥（Illumination Cones）模型的多姿态、多光照条件人脸识别方法。Blanz和Vetter^[35]等提出的基于3D形变模型（3D Morphable Model）的多姿态、多光照条件人脸图像分析与识别方法采用图形学模拟的方法对图像采集过程的透视投影和光照模型参数进行了建模，从而可以使得人脸形状和纹理等人脸内

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库