**提示信息：**本页为论文书脊，打印后与下页（封面）粘贴后，一般通过复印套印在学校统一的论文封皮上制作论文封面，具体做法请咨询校印刷厂论文制作人员。

书脊字体可根据论文厚度自行调整。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

**提示信息：**为保证本文中的链接能够使用，请您先将本文件按规定的命名方式命名，并与“[USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe](file:///C:\Users\a\AppData\Roaming\Microsoft\Word\USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe)”保存于同一目录。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

**提示信息：本文档设置了宏，建议将Word的宏安全级别调整为“中”（可自行决定是否执行宏），并且在本文档打开时允许执行宏。这样才会在上面的工具栏中出现“USTB硕士论文工具栏”。**（选择“工具”菜单>“宏”>“安全性”，来调整安全级别）

**若未出现上述工具栏，请调整安全级别为“中”，然后关闭文档重新打开。**

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

北京科技大学

请将“公开”等具体密级文字居中位于下划线中间，谢谢。不用此信息时，删除此框。

自2010年6月毕业的学生开始，论文封面均要求标注密级。**密级为公开的，请将下一行的加密论文编号文本框删掉，论文封面仅有密级这一行。**

密级为非公开的，应填写加密论文编号，该编号为01、02、03或04，分别为送交学校的四本论文的依次编号，以便后续对加密论文进行管理。

不用此信息时，删除此框。

密级中请选一，选定后将其余删除。对于非公开文献还应在密级后标注“★”和年限。例“秘密★5年”。密级为非公开的，请向导师、学院、校保密办办理相应申请手续。

不用此信息时，删除此框。

**加密论文编号：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**密　　　　级：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**提示信息：**此页为封面，请打印在普通A4空白纸上，将书脊粘贴在左面，通过复印套印在学校统一制作的封皮上制作论文封面。评阅用论文、答辩用论文以及最终上交的论文应有套印后的论文封面。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

论文题名一般不宜超过25个汉字。题名应避免使用不常见的缩略词、首字母缩写，避免使用缩略词、字符、代号和公式等，对于题名和副题名的具体要求请见[USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe](file:///C:\Users\a\AppData\Roaming\Microsoft\Word\USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe)。

论文题名和副题名在整本论文中不同地方或填写学位申请有关表格中出现时，应完全相同。

请尽量调整字号大小，使1行能够显示题名和副题名。若题目过长，影响到美观，可调整为两行。

不用此信息时，删除此框。

论文题目：

——

**提示信息：**无副标题时，请删除本行内容，但请勿删除此行，以确保后续各行位置不变，后续副题名处理相同。

不用此信息时，删除此框。

**提示信息：盲审论文**请保持学号和作者这两项为空白，以供学校送审论文时填写论文编号等。

不用此信息时，删除此框。

学　 　号：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

作　 　者：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

专 业 名 称：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**提示信息：**专业名称详见“[USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe](file:///C:\Users\a\AppData\Roaming\Microsoft\Word\USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe)”，不用此信息时，删除此框。

年月日

**提示信息：**单击相应的年月日将其修改为实际的论文提交日期，不用此信息时，删除此框。

**提示信息：**此页为封二，也即装订好的论文的第一页，此页应包括论文的中英文题名，以及作者、指导教师、所在学校和学院等信息的中英文，还可包括研究项目、版权等方面内容的中英文，具体格式应美观大方、实用。

不用此信息时，删除此框。

——

——

研究生姓名：

指导教师姓名：

北京科技大学学院

**提示信息：**请使用规范的学院和专业名称（中英文），具体请查阅“[USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe](file:///C:\Users\a\AppData\Roaming\Microsoft\Word\USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe)”

不用此信息时，删除此框。

北京100083，中国

Master Degree Candidate：

Supervisor：

School of

University of Science and Technology Beijing

30 Xueyuan Road，Haidian District

Beijing 100083，P.R.CHINA

分类号：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 密　　级：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

分类号请去图书馆305（或306）室（工具书室）查阅。分类号为必填项目。不用此信息时，删除此框。

１０００８

ＵＤＣ：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 单位代码：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

UDC建议填写，不用此信息时，删除此框。

密级中请选一，选定后将其余删除。对于非公开文献还应在密级后标注“★”和年限。例“秘密★5年”。密级为非公开的，请向导师、学院、校保密办办理相应申请手续。

不用此信息时，删除此框。

**北京科技大学硕士学位论文**

**论文题目：**

——

**作者：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**提示信息：**论文题名同封面，请尽量调整字号大小，使1行能够显示题名。若题目过长，影响到美观，可调整为两行。

副题名若无，请保留空行。

不用此信息时，删除此框。

**指 导 教 师： 单位：**

**指导小组成员： 单位：**

有多个指导小组成员时，请您重复该行，并使该页能够在１页显示下。不用此信息时，删除此框。

**单位：**

单击相应的年月日将其修改为实际的论文提交日期，不用此信息时，删除此框。

**论文提交日期：**年 月 日

**学位授予单位：北 京 科 技 大 学**

致 谢

盲审论文：请不要填写致谢，致谢页除标题、页眉、页码外请保持空白。不用此信息时，删除此框。

**提示信息：**论文作者可以在致谢页对下列方面致谢：

* 国家科学基金，资助研究工作的奖学金基金，合同单位，资助或支持的企业、组织或个人；
* 协助完成研究工作和提供便利条件的组织或个人；
* 在研究工作中提出建议和提供帮助的人；
* 给予转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者；
* 其他应感谢的组织或个人。

学位论文的致谢用语应规范，感情真挚，言辞恳切，谦虚诚恳，实事求是。致谢辞体现着作者的学术修养和文化修养。

致谢辞主要感谢导师和对论文工作有直接贡献及帮助的人士和单位。学位申请人的家属及亲朋好友等与论文无直接关系的人员，一般不列入致谢的范围。

致谢请控制在一页。不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

摘 要

**提示信息：**论文中文摘要**字数约为300-600字**，如遇特殊需要字数可以略多。

论文摘要是论文内容不加注释和评论的简短陈述，一般以第三人称语气写成。摘要的编写应遵循下列原则：

1）摘要应具有独立性和自含性，即不阅读论文的全文，就能获得必要的信息。摘要是学位论文的缩影，是学位论文的主要内容、见解、结论简短明了的缩写。

2）摘要应是一片完整的短文，可以独立使用，可以引用。

3）摘要的内容应包含与论文等同量的主要信息，供读者确定有无必要阅读全文，也可供文摘汇编等二次文献采用。

4）摘要一般应说明研究工作的目的意义、研究方法、研究结果、主要结论及意义、创造性成果和新见解，而重点是结果和结论。

5）要用文字表达，不要附图和照片，除了实在无变通办法可用以外，摘要中不用图、表、化学结构式、非公知公用的符号和术语，不要使用表格、公式、上下标以及其他特殊符号，要突出重点，阐述清楚，少用数据表。

论文摘要用语力求简洁、准确。原则上300-600字。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

关键词： （用逗号“，”分隔）

**提示信息：**中文关键词应为3-5个，用中文逗号“，”分隔。关键词是学位论文的检索标志，从学位论文中选取出来用以表示全文主题内容信息款目的单词或术语。关键词的选择关系到学位论文被检索和利用的效果，因此应全面、准确、规范。并应尽量采用《汉语主题词表》或各专业主题词表提供的规范词。不用此信息时，删除此框。

请不要移动关键词框的位置。该框距页上顶25cm，距页左边4cm。

Abstract

**提示信息：**英文摘要和关键词应当与中文相同，英文摘要的实词在300个左右。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

Key Words： （用英文逗号“,”分隔）

序

**提示信息：**序并非必要。论文的序，一般是作者或他人对本篇论文基本特征的简介，如说明研究工作起源、背景、主旨、目的、意义、编写体例，以及资助、支持、协作、经过等；也可以评述和对相关问题研究阐发。这些内容也可以在主体部分引言中说明。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

**不用此页时，请删除此页。**

目 录

**提示信息：**为保证本文中的链接能够使用，请您先将本文件按规定的命名方式命名保存，并与“[USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe](file:///C:\Users\a\AppData\Roaming\Microsoft\Word\USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe)”保存于同一目录。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

**提示信息：**本页的目录为**自动更新**，请在每次打印前在目录中任何位置点右键选“更新域”“更新整个目录”来自动更新此目录。整套论文分卷编制时，每一分卷均应有全部报告内容的目录。

不用此信息时，删除此框。

本模板适用于**参考文献**采用**顺序编码制**标注和著录的**学院**

不用此信息时，删除此框。

[致 谢 I](#_Toc432955278)

[摘 要 III](#_Toc432955279)

[Abstract V](#_Toc432955280)

[序 VII](#_Toc432955281)

[插图和附表清单 XI](#_Toc432955282)

[缩写和符号清单 XIII](#_Toc432955283)

[术语表 XV](#_Toc432955284)

[1 引言 1](#_Toc432955285)

[2 文献综述 2](#_Toc432955286)

[2.1 测度学习的发展背景 2](#_Toc432955287)

[2.2 测度学习 3](#_Toc432955288)

[2.2.1 马氏距离 4](#_Toc432955289)

[2.2.2 线性测度学习 5](#_Toc432955290)

[2.2.3 非线性测度学习 7](#_Toc432955291)

[2.2.4 结构化测度学习 7](#_Toc432955292)

[2.3 测度学习相关领域 8](#_Toc432955293)

[3 近似相似度测度学习 10](#_Toc432955294)

[3.1 相似度测度学习 10](#_Toc432955295)

[3.1.1 余弦距离 10](#_Toc432955296)

[3.1.2 余弦相似度测度学习理论 11](#_Toc432955297)

[3.1.3 缺陷 12](#_Toc432955298)

[3.2 近似余弦相似度测度学习 12](#_Toc432955299)

[3.2.1 理论 12](#_Toc432955300)

[3.2.2 算法复杂度分析 13](#_Toc432955301)

[3.3 实验 15](#_Toc432955302)

[3.3.1 UCI数据集分类 15](#_Toc432955303)

[3.3.2 LFW人脸验证数据集分类 17](#_Toc432955304)

[3.4 结论 19](#_Toc432955305)

[4 深度测度学习 20](#_Toc432955306)

[4.1 深度学习简介 20](#_Toc432955307)

[4.2 深度测度学习 20](#_Toc432955308)

[4.2.1 深度测度学习理论 21](#_Toc432955309)

[4.2.2 混合深度测度学习 23](#_Toc432955310)

[4.3 实验 25](#_Toc432955311)

[4.3.1 UCI数据集分类 25](#_Toc432955312)

[4.3.2 LFW人脸验证数据集分类 26](#_Toc432955313)

[4.4 结论 29](#_Toc432955314)

[5 测度学习在图像检索中的应用 30](#_Toc432955315)

[6 结论 31](#_Toc432955316)

[参考文献 33](#_Toc432955317)

[作者简历及在学研究成果 38](#_Toc432955318)

[独创性说明 41](#_Toc432955319)

[关于论文使用授权的说明 41](#_Toc432955320)

[学位论文数据集 43](#_Toc432955321)

插图和附表清单

**提示信息：**插图或附表清单并非必要。论文中如图表较多，可以有此页。图的清单应有图号、图题、和页码。表的清单应有表号、表题和页码。

根据所列内容，可将本页标题分别更改为“插图清单”、“附表清单”。

此页并非必要。**不用此页时，请删除此页。**

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

缩写和符号清单

**提示信息：**此页并非必要。符号、标志、缩略词、首字母缩写、计量单位等的注释说明，如需汇集，可集中置于此页。

根据所列内容，将本页标题分别更改为“符号清单”、“标志清单”、“缩写清单”、“计量单位清单”等。

不用此信息时，删除此框。

此页并非必要，**不用此页时，请删除此页。**

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

术语表

**提示信息：**此页并非必要。若文中术语及其注释说明需要汇集，可集中置于此页。

不用此信息时，删除此框。

此页并非必要。**不用此页时，请删除此页。**

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

1. 引言

二十一世纪以来，人类进入了一个全面的信息时代。随着科学技术的发展和进步，信息在人类生活中的地位和作用越发的突显，人类对信息质量的要求也越来越高。因此，如何高质量的传递、储存和处理信息成为了人类亟待解决的问题。

在机器学习、模式识别、数据挖掘等领域，选择合适的测量准则衡量数据特征之间的距离或者相似度通常对解决问题起重要的作用。例如，K邻近算法(K-Nearest Neighbor, kNN)**错误!未找到引用源。**通常选择欧几里得距离计算邻近元素；K均值算法(K-means)**错误!未找到引用源。**基于数据特征之间的距离度量进行聚类分析。此外在信息检索领域，搜索算法也是基于查询关键字与数据库中相关词条的相似度进行排序。然而在实际系统中，仅仅使用欧几里得距离或者余弦距离度量数据特征向量之间的相关度往往很难表示数据之间本征特征关系。因此选择合适的测量准则对特征向量进行合理有效的度量便成为了机器学习领域的一个重要课题。但是在解决特定问题时，我们通常很难人工设计出合理有效的度量准则，因此2002年卡内基梅隆大学的Eric Xing教授提出了测度学习(Metric Learning)[2] 。测度学习的目标是根据数据之间的关系学习一个有效的度量准则，以此解决实际系统中数据之间相关性计算、分析等问题。传统的测度学习方法大多基于半正定优化问题(Semi-Definite Programming, SDP)。随着大数据的发展，海量数据和高维特征成为机器学习在实际系统应用的主流，但是由于传统的SDP问题优化求解时需要应用的特征根分解算法(Eigenvalue Decomposition) 的算法复杂度为O(n3)，所以当特征向量维度过高时求解的时间成本和空间成本都会大幅增加。

本文针对传统测度学习SDP问题优化求解高维特征向量的劣势，利用随机梯度下降算法(Stochastic Gradient Descent, SGD)和深度学习(Deep Learning, DL)层次结构的思想, 对测度学习优化过程进行改进，并在人脸识别、图像检索等实际应用上进行测试。解决大数据高维特征的测度学习优化问题，可以有效的适应当前机器学习和模式识别领域发展的趋势，为理论算法在计算机视觉实际系统中的应用提供可能。

本论文主体由四部分组成，第二章主要综述了测度学习近年来的发展；第三章介绍了余弦相似度测度学习的优势和不足，并提出了近似余弦相似度测度学习理论；第四章主要借鉴深度学习的优势，提出了深度测度学习理论；第五章具体阐述了测度学习在图像索引中的应用。

1. 文献综述
   1. 测度学习的发展背景

图像信息作为人们获取信息的重要来源，有着作用距离远、传输速度快、存储信息量大等其他形式的信息不具备的优点。图像信息的重要性无可置否，但是在实际应用中，我们所关心的往往不是图像所搭载的全部信息，只是其中的一部分信息，这时我们就需要进行对图像进行处理分析，以此来实现我们最终目的。所谓图像处理，就是利用计算机对图像进行分析，达到所需要的结果。图像处理主要包括图像压缩，增强和复原，匹配、描述和识别这几个部分，常见的图像处理方法有图像编码、图像复原、图像分割和图像分析等。

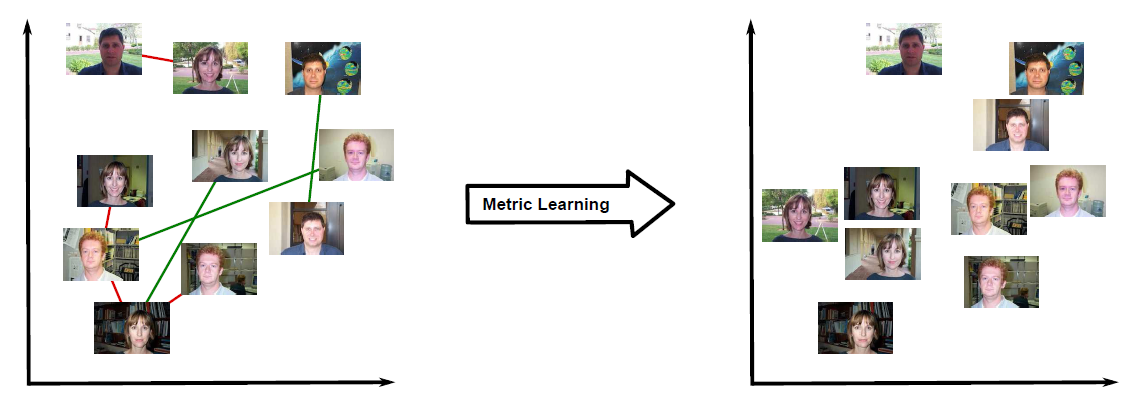


图 2-1 测度学习在人脸识别系统中的应用

图像检索和人脸识别问题是计算机视觉发展和研究的重要领域，而在处理图像检索以及人脸识别问题时，人们发现通过特征提取的方法提取图像特征往往在高维空间中呈现非线性或某种流形分布。如**错误!未找到引用源。**左图所示，由于姿态、光照、背景拍摄环境的影响，在高维空间中，同一个人的人脸照片特征分布可能距离较远，而不同人的特征距离则相对较近，这就导致我们使用KNN或者K-means算法进行特征分类时很难获得良好的分类效果。在2002年NIPS会议上，Eric Xing提出在衡量数据之间距离时不能简单使用特征向量之间的欧式距离或余弦距离进行表征，因为在高维空间中同类特征并非呈现线性分布。基于这一特性，Eric Xing提出了测度学习的概念，即通过现有标定数据的统计特性，学习一个合适的评价数据样本间距离的测量准则，减小同类数据距离，增大不同类数据间距离，如**错误!未找到引用源。**右图所示，经过测度学习投影，使得KNN或者K-means算法在处理高维复杂数据分类问题上更为有效。

* 1. 测度学习

最早的测度学习相关工作的研究可以追溯的上个世纪八十到九十年代**错误!未找到引用源。**[5] [6] ，然而卡内基梅隆大学的Eric Xing教授于2002年在NIPS会议上发表的论文[2] 则被认为是测度学习领域的先驱工作。

测度学习目的是寻找一个合适的投影矩阵，表征高维空间中不同类特征，增加类间距离、减小类内距离以此简化分类问题。因此，我们定义

(2-1)

其中集合表示同类数据构成集合，集合表示不同类数据构成集合。因此，我们可以简单的将测度学习目标函数定义为

(2-2)

其中表示测度学习投影矩阵，表示M的相关约束项，为损失函数(loss function)，为正则项(regularization)，为常数。不同的测度学习方法会选择不同的距离表示方法、损失函数、正则项。在经过测度学习后，通过投影矩阵M对特征进行映射，我们可以更好的使用k-means、kNN、SVM等分类器对数据进行进一步的分析。

我们可以根据学习方式、距离表示的形式、优化求解方法、是否降维等特性对各种测度学习算法进行分类。根据测度学习的学习方式可以将其分为监督学习(fully supervised)、弱监督学习(weakly supervised)以及半监督学习(semi-supervised)。

1. 监督学习

定义训练数据集，其中特征向量、标签。监督学习是在明确的指导信息下进行训练的。在训练过程中，我们根据训练数据集的标签指导信息以及的约束条件求解投影矩阵M。

1. 弱监督学习

对于弱监督学习，其训练数据集没有明确的标签指导信息，我们通过数据集只能获得边缘信息，例如搜索引擎中用户的点击信息、文章引用信息等。

1. 半监督学习

对于半监督学习，其训练数据集分为两部分，一部分是包含有标签的数据项，另外一部分是未标定数据集。在互联网大数据时代，大部分数据都是未标定数据，因而在各种工业系统应用测度学习时通常采用半监督学习方法进行训练，该种训练方法在充分利用数据的同时，也可以防止标签信息货边缘信息不足而导致的模型过拟合现象。

根据距离表示形式可以分为线性距离(linear metrics)、非线性距离(nonlinear metrics)和局部距离(local metrics)。

1. 线性距离

线性距离(例如欧氏距离)通常表现形式简单，但由于其损失函数为凸函数，因此在进行优化求解时可以直接通过梯度下降算法求解全局最优解。

1. 非线性距离

非线性距离(例如距离)，其目标函数非凸，因而其求解投影矩阵为局部最优解，求解难度较大并且容易过拟合。

测度学习的优化方法根据目标函数的不同分为凸优化方法和非凸优化方法。对于目标函数为凸函数的问题，采用凸优化方法，求解的投影矩阵为全局最优解(global optimum)；对于目标函数非凸的问题，最终求解的投影矩阵为局部最优解(local optimum)。

此外，不同的测度学习算法根据是否降维也可以进一步分类。一些测度学习算法通过将数据特征投影到新的低维特征空间获得更紧致的特征已达到更好的分类效果和更快的计算速度。

* + 1. 马氏距离

所谓马氏距离(Malahanobis Distance)，其定义为

(2-3)

其中为特征向量，，表示维空间上对称半正定(symmetric positive semi-definite)锥所围成的空间，如图 2-2所示。当为单位矩阵时，马氏距离即为欧几里得距离。

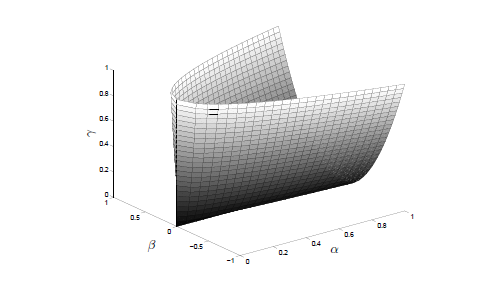


图 2-2 对称半正定矩阵所表征的空间

为半正定矩阵可以确保马氏距离有如下性质

1. 非负性：
2. 同一性：
3. 对称性：
4. 三角不等关系：

此外，因为M为对称半正定矩阵，因为我们可以将M表示为，则马氏距离可表示为

(2-4)

如果M为低秩矩阵，即，则矩阵M相当于将原特征向量映射到一个低维空间，这将保证我们获得更紧致的特征向量从而减小距离计算时的时间和空间复杂度、较小存储特征向量所用的空间以及获取更好的分类效果。

在测度学习求解马氏距离中，要保证投影矩阵M始终满足对称半正定约束，最有效的办法是使用投影梯度法(Projection Gradient Method)，该种方法通过将负特征向量置零，保证每次将计算的梯度均可投影到一个对称半正定锥所围成的求解空间内。但是由于投影梯度法的时间复杂度为，因此当特征向量维度*d*过大时，投影梯度法的计算复杂度增加。此外，由于优化低秩矩阵约束为NP问题，因此如何学习一个低秩投影矩阵代替满秩矩阵达到更好的分类效果，也是测度学习中亟需解决的问题。

* + 1. 线性测度学习

线性测度学习通常基于马氏距离表达式，求解对称半正定投影矩阵M。

最早提出测度距离，并将马氏距离应用在测度距离求解的方法是Eric Xing[2] ，他提出的测度学习算法基于无正则项的凸优化目标函数

(2-5)

Eric Xing通过在梯度下降算法中使用投影梯度法保证M的对称半正定特性，求解投影矩阵M。

Weinberger等人提出的最大边缘最邻近算法(Large Margin Nearest Neighbors, LMNN)**错误!未找到引用源。**[8] [9] 是线性测度学习算法中应用相当广泛的算法之一。LMNN算法其优化目标函数为

(2-6)

其中。LMNN与SVM类似[10] ，使用hinge loss作为损失函数，因而在求解LMNN时，可以采用传统的梯度下降法(gradient descent method)或者基于在线学习(online learning)的随机梯度下降算法(stochastic gradient descent, SGD)。

信息论测度学习算法(Information-Theoretic Metric Learning, ITML)[11] 是另一基于马氏距离测度学习的经典算法。该算法引入对数散度正则项(LogDet divergence regularization)

(2-7)

其中d为输入特征向量的维度，为对称半正定矩阵。在实际应用中，通常将先验对称半正定矩阵为单位矩阵或者训练数据的协方差矩阵。单位矩阵约束可以保证学到的马氏距离更接近欧氏距离，协方差矩阵约束则可以保证投影矩阵在训练数据集上有最大类间距离。对数散度正则项是根据信息论中最小化两个参数分别为和的多维高斯分布的KL散度(KL divergence)获得的，其意义在于传统的马氏距离测度学习中引入了概率和信息论的概念，使所学的投影矩阵更符合某种统计学特性。ITML优化的目标函数为

(2-8)

其中为截断阈值。ITML算法的缺陷在于先验对称半正定矩阵需要手工给定，并且其正则项推倒假设基于高斯分布，因而并非适用于各种类型的数据。

随着稀疏表示(Sparse Representation)的发展，在各种机器学习问题中引入稀疏性可以增加机器学习系统的鲁棒性，在2009年ICML会议上，Qi等人提出了稀疏距离测度学习(Sparse Distance Metric Learning, SDML)[12] 。SDML的目标函数可以表示为

(2-9)

其中为除对角线元素外的L-1范数，通过该范数约束保证求解投影矩阵的稀疏性。SDML通过引入辅助变量将目标函数转换为半定优化问题(Semi-Definite Programming, SDP)使用区域坐标下降法(block coordinate descent)[14] 进行求解。

* + 1. 非线性测度学习

非线性测度学习较线性测度学习而言，虽然由于其目标函数通常为非凸函数，求解投影矩阵通常为优化问题的局部最优解而非全局最优解，在实际问题中容易对训练数据产生过拟合现象，但因为其非线性特性因而具有比线性测度学习更强的表达能力，因此也被广泛应用。

非线性测度学习通常分为两类问题，一类问题成为核函数化(kernelization)，该种方法与核函数学习方法类似，其目的是通过核函数映射的方法，在非线性特征空间中学习线性测度表示[15] [16] 。尽管通过核函数非线性映射，但是由于线性测度学习表达式均为矩阵内积运算(即线性投影)，因此会造成导数难以求解等问题。此外由于核函数映射需要矩阵映射原数据特征向量(其中n为训练数据集总量)，因此当训练数据集过大时，该优化问题将变得很难求解。另一类非线性测度学习目标是学习一个非线性距离。Chopra提出非线性测度学习方法[17] ，该方法通过学习非线性映射最小化L1距离。其中非线性映射函数并没有具体的函数形式或假设，参数W通过卷积神经网络(convolution neural network, CNN)利用后向传播算法(back-propagation, BP)与随机梯度下降算法(stochastic gradient descent, SGD)最小化损失函数学习。

* + 1. 结构化测度学习

结构化测度学习基于结构化支持向量机(Structural SVM)的求解框架，最早由McFee在2010年ICML会议上提出，是用于解决信息检索中的排序问题而提出的测度学习排序算法(Metric Learning to Rank, MLR)[18] 。其目标函数为

(2-10)

其中

(2-11)

分别为重排序标签以及原标签，为排序函数。该优化问题通过割平面(cut plane method)进行优化求解。

由于测度学习容易受噪声数据影响，因而McFee在2013年ICML上基于MLR算法又提出了鲁棒性结构化测度学习(Robust Structural Metric Learning to Rank, R-MLR)[19] ，其目标函数为

(2-12)

其中，即该范数表示投影矩阵W每行L2范数求和。由于结构化支持向量机割平面优化求解问题的方法的算法复杂度为，因此McFee将原优化问题分解为三个子优化问题并引入拉格朗日乘子进行求解。

* 1. 测度学习相关领域

测度学习作为机器学习领域的一个重要分支，在计算机视觉、信息检索等领域扮演着重要角色。对于计算机视觉问题，一个合适的测度投影矩可以有效的表示和处理从图像和视频中通过词袋模型(Bags-of-Visual-Words, BoVW)[13] 或者卷积神经网络(Convolution Neural Network, CNN)**错误!未找到引用源。**等特征提取算法提取出的特征向量。近年来，测度学习在大规模数据计算机视觉系统中被广泛应用，其应用方面涉及图像分类(image classification)[20] 、目标检测(object recognition)[21] [23] 、人脸识别(face recognition)**错误!未找到引用源。**、目标跟踪(visual tracking)[25] 以及图像检索与标注(image retrieval and annotation)[26] 等领域。对于信息检索问题，大多数信息检索系统都是通过计算特征向量之间的相似性进行检索结果的查找和排序的，因此，选择合理的相似性计算准则对信息检索系统的准确率和召回率均有很大的提升。

测度学习作为机器学习领域内的一个重要分支，与其他机器学习问题如核方法(kernel learning)[27] [28] 、降维问题(dimensionality reduction)**错误!未找到引用源。**有密切的联系和区别。

核方法通常都是无参的(nonparamteric)。核方法是通过数据本身的统计特性，在没有对核函数附加任何约束条件下，利用产生式模型(generative model)的方法生成核矩阵(kernel matrix)，实现数据映射。因此核方法通常受限于数据分布类型，对于未知或者与训练数据分布不相符的测试数据集，核方法所学的投影矩阵很难达到较好的分类或聚类效果。不同于核方法，多核学习方法(multiple kernel learning)是一种有参模型，该方法通过学习预先定义的核函数中的超参数投影表征特征。但是由于核函数中超参数是根据先验知识设定，因此该方法在应用上比核方法更受限制。而对于测度学习问题，通常都是有参问题(parametric problem)的研究(即通常我们需要学习一个参数矩阵表征特征)，但是其参数投影矩阵的求解通常只要求投影矩阵半正定，因此其在实际系统中比起核方法和多核方法具有更好的适应性和灵活性。

对于特征降维问题，通常分为监督降维(supervised dimensionality reduction)与无监督降维(unsupervised dimensionality reduction)。对于监督学习降维问题，其目标通常是寻找一个低维表征空间，可以最大化不同标签数据之间的空间距离分布。对于无监督学习降维问题，又称为流形学习(manifold learning)，其通常认为数据在低维空间中呈某种流形分布，通过线性或非线性映射可以在保持原有数据统计特征(方差、距离等)不变并投影特征是数据具有不再具有复杂的流形分布特性。相较各种特征降维算法，一些测度学习通过构造新的低维特征空间映射原数据特征向量，减小类内距离、增大类间距离，其目的与降维算法异曲同工。

1. 近似相似度测度学习
   1. 相似度测度学习
      1. 余弦距离

欧几里得距离是我们经常衡量数据之间相关性的距离准则之一，除此之外，余弦相似度(Cosine Similarity)也是我们经常用来衡量数据之间关系的重要指标。

首先根据定义余弦距离为

(3-1)

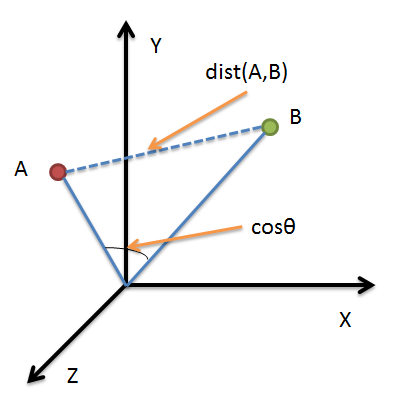


图 3-1 欧氏距离与余弦距离示意

如图 3-1，欧氏距离衡量空间中两点之间的距离，余弦距离衡量空间中两个向量之间方向上的差异。由于余弦距离更加注重维度之间的差异性，因此其可以有效的规避个体相同认知中不同程度的差异表现，而欧氏距离更加注重数值上的差异，衡量的是两个向量之间的相同程度。根据公式(3-2)我们可以发现，当对特征向量进行归一化处理后，欧氏距离等价于余弦距离。此时我们可以认为在一个归一化超球面上，欧氏距离表示的是球面上两点的直线距离，余弦距离表示的是球面上两点的球面距离，本质上相同。

(3-2)

根据余弦距离的表达式我们可以发现，而欧氏距离，因此余弦距离在衡量数据相关性做进一步归一化处理更为直观和方便。

* + 1. 余弦相似度测度学习理论

Qamar & Gaussier提出广义余弦相似度学习方法(Generalized Cosine Similarity Learning Algorithm, gCosLA) [30] ，其余弦相似度表达式为

(3-3)

其中。当M矩阵为单位阵时该距离为余弦距离。Qamar使用Hinge Loss作为损失函数，基于约束投影矩阵M具有对称半正定性质，作者提出了一种基于批数据的在线学习方法，利用特征根分解求解投影矩阵M。

在2010年亚洲计算机视觉会议上，Nguyen & Bai同样提出了余弦相似度测度学习算法(Cosine Similarity Metric Learning, CSML)[31] 。与Qamar不同，Nguyen的优化目标函数基于相似度表达式为

(3-4)

根据公式(2-1)，Nguyen定义了测度学习的损失函数为

(3-5)

其中集合表示同类数据构成集合，集合表示不同类数据构成集合，损失函数公式(3-5)通过最大化正负样本之间的距离求解投影矩阵。参数用来处理正负样本不平衡问题，我们可以简单的将赋值为

(3-6)

也可以利用交叉验证(cross validation)的方法对进行计算求解。为正则项(regularizer)，用来约束求解投影矩阵参数，抑制过拟合问题。

Nguyen使用共轭梯度法(Conjugate Gradient Descent Method, CGD)对公式(3-5)进行优化，根据公式(3-4)和(3-5)可以计算出余弦距离的梯度为

(3-7)

其中

(3-8)

* + 1. 缺陷

根据公式(3-5)、(3-7)、(3-8)，我们可以得出余弦距离梯度的复杂度为O()，其中为训练样本的数量，为特征向量的维度，为经过测度学习投影后特征向量的维度。因此我们可以得到余弦测度学习算法的复杂度为O()，其中为优化目标函数迭代次数，*b*为交叉验证过程的次数，*g*为共轭梯度法迭代的次数。

因此我们可以发现，当训练数据集的特征向量维度过高时，相似度测度学习的时间复杂度和空间复杂度会迅速增加，导致我们很难计算出测度学习所需要的投影矩阵。因此，本文提出了近似余弦相似度测度学习方法(Qusai Cosine Similarity Metric Learning, QCSML)[32] ，以此解决相似度测度学习在处理高维特征向量所遇到的问题。

* 1. 近似余弦相似度测度学习

本章节主要介绍近似余弦相似度测度学习方法，引入hinge-loss作为目标函数，使用随机梯度下降进行目标函数优化。

* + 1. 理论

首先我们定义训练集，余弦相似度的定义如公式(3-4)所示，根据不等式，我们可以对余弦相似度作如下变换:

(3-9)

因此余弦相似度可以表示为

(3-10)

为了简化余弦距离表达式，我们可以对投影矩阵W增加先验约束，即

(3-11)

其中表示矩阵的F正则项(Frobenius norm)，Tr()表示矩阵的迹(trace)。同时，我们可以将训练集特征向量进行归一化处理，即令，这样我们可以将余弦距离化简为

(3-12)

定义为一对训练样本的标签信息，则可以定义

(3-13)

同时，定义余弦距离的参数阈值*b*，以此区分是否属于同一类，则可以得到约束

(3-14)

根据公式(3-12)和公式(3-14)，可以将该问题的约束条件转化为

(3-15)

根据支持向量机(Support Vector Machine, SVM)[33] 的思想，利用hinge loss最大化两类问题之间的间隔，构建目标函数可以得到

(3-16)

对于有约束优化问题，使用拉格朗日乘子法(Lagrange Multipleier Method)转化为无约束优化进行求解，首先对训练集特征向量进行归一化处理，则原目标函数可以转化为

(3-17)

其中为拉格朗日乘子并且满足约束条件。

* + 1. 算法复杂度分析

根据公式(3-17)所示，近似余弦测度学习的目标函数为凸函数，因此我们可以利用梯度下降方法去优化求解该目标函数。

为了适应高维特征向量和大数据，我们采用随机梯度下降方法(Stochastic Gradient Descent, SGD)**错误!未找到引用源。**代替Nguyen使用的共轭梯度法。根据目标函数，我们可以得到投影矩阵的优化梯度更新公式为

(3-18)

其中为学习率，表示目标函数，则目标函数的梯度为

(3-19)

同时阈值*b*的更新公式为

(3-20)

其中为调整阈值*b*的偏置系数。

表 3-1 近似余弦相似度优化算法流程伪代码

|  |
| --- |
| 算法：近似余弦相似度测度学习优化算法 |
| **输入**：训练数据  **输出**：参数  **Begin**  参数初始化;      ;  ;  **for** to *n* **do**  **switch****do**  **case** 1:  score = ;  **if** score **then**  ;  ;  **break;**  **case** -1:  score = ;  **if** score **then**  ;  ;  **break;**  **return** ; |

近似余弦相似度测度学习算法优化的具体流程如表 3-1所示，其中参数的设置对测度学习参数优化的结果起重要的作用。学习率控制梯度下降的速度，由于通常随机梯度下降算法使用batch进行迭代优化，因此学习率设置与其他梯度下降算法例如L-BFGS、共轭梯度法等应该较小，以此保证优化迭代的损失函数不会因为局部采样不具有显著性而产生较大波动。此外，也是优化目标函数中非常重要的参数之一。

尽管公式(3-17)所示的优化目标函数为凸函数，但是一个较好的投影矩阵初始值可以很快的是随机梯度收敛到全局最优解。本文中使用白化主成分分析(Principal Components Analysis Whitening, PCA-Whitening)和K均值(K-means)的方法初始化投影矩阵*M*。

根据表 3-1可知目标函数梯度计算的复杂度为O()，其中为输入特征向量的维度，为经过投影矩阵计算输出的维度。因此近似余弦相似度测度学习的算法复杂度为O()，较余弦相似度测度学习算法的时间复杂度O()大大地提高。

* 1. 实验
     1. UCI数据集分类

本章节分别选择Iris[[1]](#footnote-1)、Ionosphere[[2]](#footnote-2)和wine[[3]](#footnote-3)三个UCI常用数据集对论文算法进行测试评估。上述三个数据集的详细信息和处理方法如下:

1. Iris数据集：该数据集有3类共计150个样本组成(每类50个样本)，每个样本的特征向量维度为4维，实验中设置训练集为120个样本(每类数据40个样本)，测试集为30个样本。
2. Ionosphere数据集：该数据集有2类共计351个样本组成，其特征向量维度为34维，实验中随机抽取200个样本为训练集，其余151个样本为测试集。
3. Wine数据集：该数据集共有3类数据总计178个样本，其特征向量维度为13维。我们随机抽取150个样本作为训练集，其余28个样本作为测试集。

实验从分类准确率和训练速度两个方面进行评估，并与以下方法进行对比：

1. 欧氏距离(Euclidean)：欧氏距离表达式
2. 协方差距离(InvCov)：协方差距离为特殊的马氏距离，其投影矩阵为训练集的协方差矩阵，该投影矩阵等即为对训练数据集做主成分分析求得投影矩阵。
3. 最大近邻测度学习(LMNN)**错误!未找到引用源。**[8] ：最大近邻测度学习(Large Margin Nearest Neighbor Metric Learning Method, LMNN)由Weinberger提出，利用hinge loss优化欧氏距离最大间距求解投影矩阵。
4. 信息论测度学习(ITML)：信息论测度学习(Information-Theoretuc Metric Learning, ITML)引入LogDet正则项并使用相对熵损失函数对测度学习进行优化。
5. 稀疏距离测度学习(SDML)：稀疏距离测度学习(Sparse Distance Metric Learning)使用L1正则项作为稀疏约束优化距离测度学习目标函数。

表 3-2 不同测度学习算法在UCI数据集上的分类错误率(%)比较

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | IRIS | IONOSPHERE | WINE |
| Euclidean | 4.00 | 14.86 | 4.5 |
| InvCov | 8.67 | 17.71 | 43.82 |
| LMNN**错误!未找到引用源。**[8] | 3.34 | 14.29 | 2.25 |
| ITML[11] | 3.00 | 17.14 | 3.94 |
| SDML(IDENTITY MATRIX) [12] | 2.00 | 13.71 | 0.5618 |
| SDML(Inverse Covariance) [12] | 2.00 | 12 | **0** |
| QCSML(random) | 4.34 | 13.49 | 5.81 |
| QCSML(K-means) | **1.04** | 7.99 | **0** |
| QCSML(PCAW) | 2.22 | **6.93** | **0** |

图 3-2 不同测度学习算法训练时间比较

不同测度学习在UCI三个数据集上分类结果如表 3-2所示，可以看出QCSML算法计算出的投影矩阵在分类精度上要明显优于其他测度学习算法。同时我们针对不同的*W*投影矩阵初始化方法进行了对比发现，对训练集采用白化主成分分析或者K均值方法进行*W*初始化，有助于随机梯度下降方法在有限迭代次数内收敛到更优解。

如图 3-2比较了QCSML与其他测度学习算法在训练时间上的差异，我们可以看到QCSML在UCI三个数据集上的训练时间远远快于LMNN和ITML，与SDML算法的计算时间成本基本在一个数量级上。此外，由于QCSML采用随机梯度下降算法，因此在针对高维向量和大数据训练集时会有更明显的训练速度差异。

* + 1. LFW人脸验证数据集分类

本章节采用QCSML算法对人脸识别领域的公共测试数据库LFW[[4]](#footnote-4)进行测试评估。

LFW数据集[36] 是人脸识别领域知名的公共测试数据集，数据集包含5749个人总计13233张人脸图片。LFW将数据分成10个部分，其中每个部分包含600对人脸测试样本(300对正样本，300对负样本)，其总共包含两种测试方法——受限配置测试方法和非受限配置测试方法。对于受限测试方法，每次选择9个部分5400对样本作为训练数据集，余下的600对样本作为测试数据及，依照此规则分别测试10个部分，计算平均准确率和方差；对于非受限测试方法，可以选择除测试600对样本之外的任何数据作为训练，然后进行测试并计算准确率和方差。

对于人脸验证问题，如何寻找一个鲁棒的特征表征人脸图片同样是影响验证准确率的重要因素。本文采用费舍尔向量(Fisher Vector, FV)作为人脸图像的特征向量。费舍尔向量在诸多计算机视觉领域如图像分类[38] 、图像索引[39] 、人脸识别[40] 上均有优异的表现。本文使用ROC曲线评价人脸验证的准确率。

对于受限测试方法，我们比较B/G sample方法[41] 、LDML方法、DML-eig方法、LBP-CSML方法、SML方法**错误!未找到引用源。**以及Fisher Vector Face方法与QCSML方法的异同，不同人脸验证方法的准确率如表 3-3所示，QCSML在128维特征向量时，准确率为87.47%，相较FV特征直接做PCA降维到128维在准确率上提升了9%左右，相较CSML提升了将近2%左右。同时，QCSML算法也在LFW受限测试方法上超越了其他人脸识别算法。

表 3-3 QCSML方法与其他人脸验证方法在LFW受限测试方法上准确率的比较

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 方法 | 维度 | 准确率(%) |
| Combined B/G[41] | - | 86.83±0.34 |
| LDML[42] | - | 79.27±0.60 |
| DML-eig[43] | - | 85.65±0.56 |
| LBP+CSML[31] | 200 | 85.57±0.52 |
| Sub-SML[44] | 300 | 86.73±0.53 |
| FV+PCA-Whitening | 128 | 78.60±N/A |
| Fisher Vector Face | 128 | **87.47±1.49** |
| FV+QCSML | 256 | 87.10±1.25 |
| FV+QCSML | 128 | **87.47±1.99** |
| FV+QCSML | 64 | 85.20±1.39 |
| FV+QCSML | 32 | 84.53±1.74 |

表 3-4 QCSML方法与其他人脸验证方法在LFW非受限测试方法上准确率的比较

|  |  |
| --- | --- |
| 方法 | 准确率(%) |
| LDML-MKNN[42] | 87.50±0.40 |
| PLDA combined[44] | 90.07±0.51 |
| Joint Bayesian combined**错误!未找到引用源。** | 90.90±1.48 |
| Sub-SML combined[44] | 90.75±0.64 |
| Fisher Vector Faces[40] | **93.03±1.05** |
| FV+QCSML | **92.33±1.12** |

对于非受限测试方法，其实验结果如表 3-4和图 3-3所示。QCSML在LFW非受限测试方法下获得了92.33%的准确率，其结果及其接近Fisher Vector Face 93.03%的准确率。根据表 3-4所示，QCSML方法在LFW人脸验证的测试结果也超过了LDML-MKNN[42]、PLDA[44] 、Joint Bayesian**错误!未找到引用源。**以及Sub-SML[44]方法。

此外如图 3-3 (b)中ROC曲线所示，尽管QCSML算法在准确率的实验结果略低于Fisher Vector Face 93.03%的结果，但是我们可以发现在误检率较低时，QCSML算法ROC曲线明显高于Fisher Vector Face的ROC曲线，在误检率(false positive rate)为0.01时，QCSML算法的准确率为82.03%，而Fisher Vector Face的准确率仅为73.41%。对于人脸验证系统，系统本身性能往往关注的不是等错率而是低误检率时，算法准确率的高低。因此。QCSML算法相较Fisher Vector Face在实际系统中有更好的性能表现。

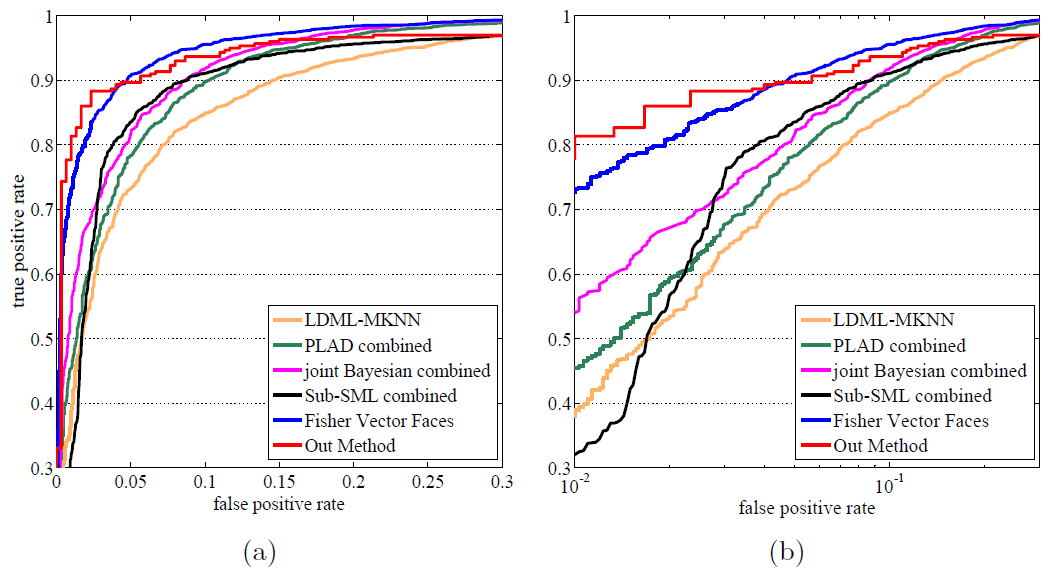


图 3-3 QCSML方法与其他人脸识别算法在LFW非受限测试下的ROC曲线。(a)为线性坐标系；(b)为对数坐标系

* 1. 结论

本章节主要介绍了余弦相似度测度学习(CSML)，并针对CSML的不足，我们提出了近似余弦相似度测度学习(QCSML)，利用向量不等式简化余弦距离，构造有约束的测度学习目标函数，然后根据拉格朗日乘子法将约束优化转化为无约束优化并使用随机梯度下降方法对目标函数进行优化求解。章节3.2的理论分析和章节3.3的实验结果表明QCSML在速度和准确率上较CSML算法和其他测度学习算法有明显的提升。

1. 深度测度学习
   1. 深度学习简介

对于传统的机器学习问题，通常应用统计学或者线性代数的理论设计一个合理有效的分类器，解决实践应用中遇到的各种问题。这些算法如支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、逻辑回归(Logistic Regression, LR)[48] 、随机森林(Random Forest)等方法均是利用数据的空间分布特性选择合适的超平面进行分类，因此当数据在特征空间上不具有可分性时，分类器分类性能下降。为了更好的表征度量方式，发现数据在特征空间上具备的各种性质，进一步提出了核方法(kernel method)。核方法固然可以通过将低维度的特征映射到无限维提高数据的可分性，然而由于计算时间复杂度和空间复杂的限制，一直很难在工业界推广，在大数据时代简单的机器学习模型会比复杂的机器学习模型更加有效。然而传统的机器学习方法，通常均是通过人工经验抽样提取特征，强调模型的分类预测性能，因而人工特征的好坏就成为机器学习系统的瓶颈。

2006年，加拿大多伦多大学Geoffrey E. Hinton教授在Science上发表了其最新的研究成果——深度置信网络(Deep Belief Network, DBN)[50] [51] ，提出了深度学习(Deep Learning, DL)概念，将机器学习研究推向了一个新的高潮。深度置信网络利用多层神经网络应用监督学习的方法学习通过一个多隐层模型利用机器学习和海量数据学习更有用的特征，以此提升分类或预测精度。区别于传统机器学习算法，深度学习突出了特征学习的重要性，通过逐层次的特征映射，将数据原空间的特征映射到一个新的特征空间中，使得分类和预测更加容易。与人工特征相比，深度学习可以利用数据学习更符合需求的专用特征，克服了人工特征不可扩展的缺陷。

* 1. 深度测度学习

所谓深度测度学习，即利用深度学习层次结构的优势，通过多次空间投影和非线性映射，利用后向传播算法(backpropogation, BP)求解测度矩阵，寻找更鲁棒的特征空间，以此提高分类精度。

本章节主要介绍深度测度学习理论、优势以及其存在的缺点，并提出了混和深度学习方法，抑制深度测度学习可能出现的诸多问题。

* + 1. 深度测度学习理论

给定训练数据集，同时定义一个对称半正定矩*M*，则马氏距离为

(4-1)

根据*M*矩阵对称半正定的性质，我们可以将其分解为，则公式(4-1)可以表示为

(4-2)

根据公式(4-2)，我们可以将参数矩阵*W*看做是将特征向量从欧式空间投影到一个分布在希尔伯特空间(Hilbert Space)的高维流行(manifold)上，同时也可以看做是人工神经网络中输入层(input layer)向隐层(hidden layer)的映射。

因此根据神经网络理论，我们可以定义

(4-3)

其中为输入层，为激活函数(activation function)。在传统的神经网络中我们定义sigmoid函数或者tanh函数作为激活函数，然而由于sigmoid函数或者tanh函数对于多层神经网络存在梯度消失现象，因此导致在很长一段时间多层神经网络并不能取得良好的分类效果。在2012年的imagenet竞赛上，多伦多大学的Hinton教授使用ReLU激活函数代替sigmoid和tanh，取得了长足的进步。ReLU激活函数如下

(4-4)

同时根据马氏距离计算公式(4-1)，可以得到

(4-5)

其中，将数据特征通过逐层非线性变化映射到分布的高维特征空间中。通用逻辑回归损失函数(Generalized Logistic loss)[52] 为

(4-6)

其中表达式通过定义是否属于同一类，为判断是否属于同一类的阈值，函数。

如果采用公式(4-6)作为目标函数，可以发现与其他最小均方误差问题相同，公式(4-5)中使用L2距离可能对异常值(outliers)比较敏感，为了克服这一缺点，我们引入L1距离

(4-7)

此外，选择一个合适的初值对于目标函数求解优化到一个较优解会产生很大的影响。因此，为了克服公式(4-6)，我们使用softmax损失函数

(4-8)

根据公式(4-8)，我们可以定义深度测度学习优化目标函数为

(4-9)

其中定义

(4-10)

表 4-1 深度测度学习算法流程

|  |
| --- |
| 算法：深度测度学习训练算法 |
| **输入**：训练数据，深度测度学习总层数*n*，学习率，迭代次数*T*，正则项参数  **输出**：参数  **Begin**  使用公式(4-11)初始化参数;  **for** to *T* **do**  随机选择迭代batch ;  ;  根据公式(4-9)以及后向传播算法(backpropagation, BP)[54] 计算梯度;  更新参数;  **return** ; |

我们使用随机梯度下降(Stochastic Gradient Descent, SGD)优化目标函数公式(4-9)。因为公式(4-9)中进过多层非线性映射，所以其优化目标函数非凸，因此一个好的初始值对优化求解问题十分关键，我们设置偏置参数*b*的初始值为0，而对于*W*采用Bengio提出的初始化方法[55]

(4-11)

其中为区间上的均匀分布，为深度测度学习*m*层输入节点的个数，深度测度学习优化求解方法如表 4-1所示。

* + 1. 混合深度测度学习

由于深度测度学习是通过样本对的相异性优化目标函数，求解参数矩阵。因此，如何克服训练数据集之间正负样本对的不平衡问题，成为影响深度测度学习性能的一个重要因素。

表 4-2 混合深度测度学习训练算法

|  |
| --- |
| 算法：混合深度测度学习训练算法 |
| **输入**：训练数据，深度测度学习总层数*n*，学习率，迭代次数*T*，正则项参数，损失权值参数  **输出**：参数  **Begin**  使用公式(4-11)初始化参数;  **for** to *n* **do**  随机选择迭代batch ;  ;  根据前向传播公式(4-9)和(4-12)计算和;  根据公式(4-14)计算混合损失函数的梯度;  根据后向传播算法(backpropagation, BP)计算深度测度学习逐层梯度;  更新参数;  **return** ; |

采样算法或者价值函数敏感(cost-sensitive)方法是机器学习中常用的解决不平衡数据学习问题的方法[56] 。采样方法通常试图通过对少数样本进行上采样(over-sampling)或者对多数样本进行降采样(under-sampling)平衡数据之间的分布，而价值函数敏感方法则通过修改损失函数技巧平衡不同样本之间对目标优化带来的影响。

对于测度学习算法，对负样本进行降采样或者对正负样本使用不同的损失函数均可以有效解决数据分布不平衡的问题。本文则提出了混合深度测度学习(Hybrid Deep Metric Leanring, HDML)的概念，通过结合分类损失函数(classification loss)和验证损失函数(verification loss)解决数据不平衡问题。

我们定义训练集为作为分类问题的输入数据，同时构造。根据多层神经网络的损失函数，我们采用相互熵损失(cross-entropy loss)函数作为分类的损失函数

(4-12)

分类信号可以保证经过多层映射后的特征在空间上具有较好的类间可分性，可以通过cross-entropy损失函数的放大有效的增加不同类之间的类间距离(inter-class distance)。而验证信号则可以有效的减小映射到同一凸锥上的样本特征的类内距离(intra-class distance)。混合深度测度学习模型表示如图 4-1所示，并且我们定义混合深度测度学习目标函数为

(4-13)

其中和为分类信号和验证信号的权值参数，为正则项，用于抑制过拟合。

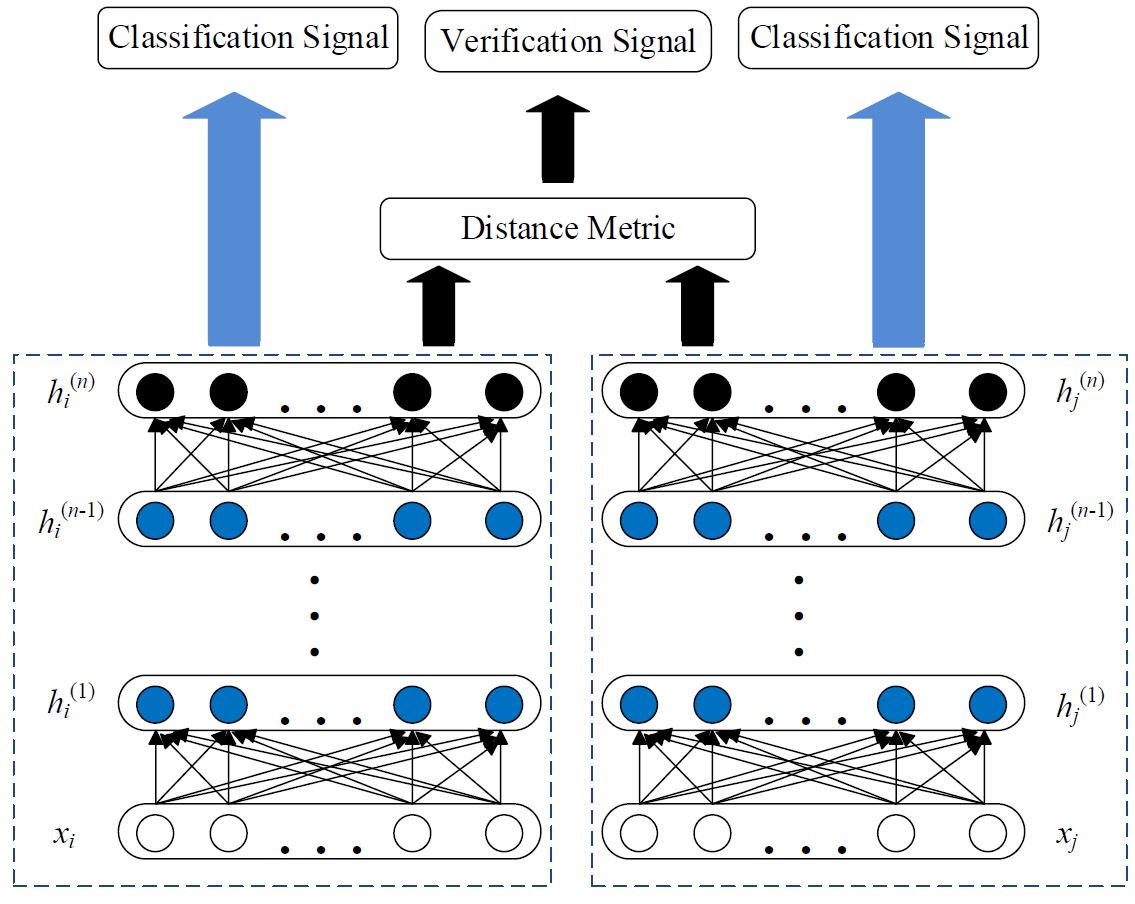


图 4-1 混合深度测度学习模型

根据公式(4-13)，可以计算混合深度测度学习损失函数层的梯度公式为

(4-14)

分类信号可以看做对于深度测度学习的一项数据依赖约束项，我们采用随机梯度下降方法优化目标函数，优化算法如表 4-2所示。

* 1. 实验
     1. UCI数据集分类

本章节分别选择Diabetes[[5]](#footnote-5)、Ionosphere[[6]](#footnote-6)和Sonar[[7]](#footnote-7)三个UCI常用数据集对论文算法进行测试评估。上述三个数据集的详细信息和处理方法如下:

1. Diabetes数据集：该数据集有2类共计768个样本，其特征向量长度为8维，实验中抽取600个样本作为训练数据集，其余168个样本作为测试数据集。
2. Ionosphere数据集：该数据集有2类共计351个样本组成，其特征向量维度为34维，实验中随机抽取200个样本为训练集，其余151个样本为测试集。
3. Sonar数据集：该数据集共208个数据，特征向量长度为60维，实验中选择150个数据作为训练集，其余58个数据作为测试集。

针对UCI数据集，我们设置HDML算法训练参数为。此外，我们设置学习率，dropout参数设置为0.5，以此来抑制可能出现的过拟合现象。

表 4-3 不同测度学习算法在UCI数据集上的分类精度(%)比较

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Diabetes | Ionosphere | Sonar |
| Euclidean | 55.83% | 63.38% | 54.76% |
| InvCov | 58.12% | 82.29% | 60.58% |
| LMNN**错误!未找到引用源。**[8] | 60.44% | 85.71% | 85.58% |
| ITML[11] | 60.21% | 82.86% | 76.44% |
| DML | 65.58% | 91.55% | 64.29% |
| HDML | **74.68%** | **92.96%** | **85.71%** |

我们使用caffe[57] 进行模型训练，然后使用kmeans算法对学到的特征进行聚类测试，DML以及HDML算法与其他测度学习算法聚类准确率对比如表 4-3所示。我们可以发现DML和HDML较其他测度学习算法可以明显的学到更优的特征空间。此外，我们还发现HDML引入分类信号可以有效的提高特征鲁棒性，寻找到更可分的高维特征空间。

* + 1. LFW人脸验证数据集分类

人脸验证实验我们使用LFW作为测试数据集，WDRef[[8]](#footnote-8)数据集作为训练数据，WDRef数据集包含2995个人总计71846张人脸图片，并且该数据集提供了LBP特征[58] 以及LE特征[59] 。

(a)

(b)

图 4-2 DML和HDML比较。(a) WDRef验证集准确率。蓝线表示HDML在验证集比对信号(verification)的准确率；绿线表示HDML在验证集分类(classification)信号准确率; 橙线表示DML在验证集比对信号(verifiction)的准确率.(b) LFW准确率。

我们将WDRef数据集按照4:1的比例分割为训练数据集和验证数据集。其中训练集包含56641个人总计1378668对样本对，测试集包含15205个人总计82082对样本对。对于HDML训练模型，我们设置验证损失函数、分类损失函数和正则项系数分别为，同时我们设置学习率，dropout为0.5。

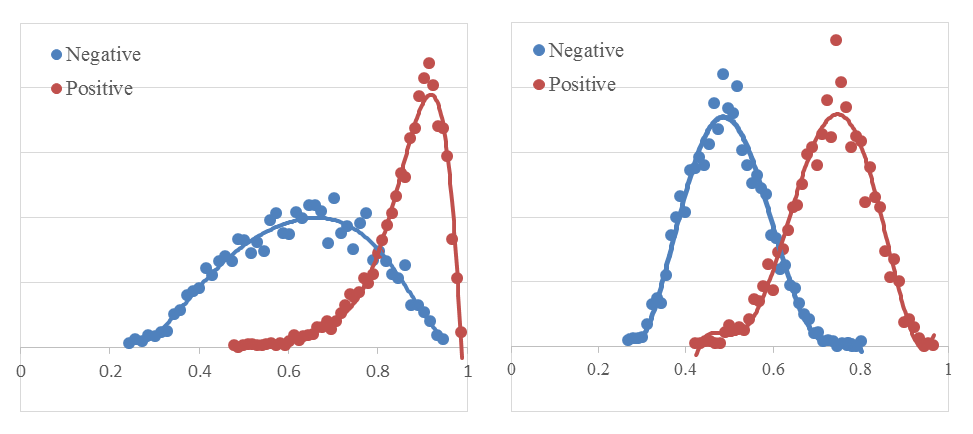


图 4-3 LFW数据集6000对测试样本分数分布：左图为DML算法结果；右图为HDML算法结果

根据图 4-2(a)(b)所示，对比蓝线和橙线很明显可以发现，引入分类信号的HDML算法在WDRef验证集和LFW测试集上均有较好的表现，由此可以证明分类信号对于提高深度测度学习泛化能力有很大的影响。此外，根据图 4-3所示，我们可以发现HDML算法在LFW数据集6000对测试样本中负样本分数分布比DML算法的分布更靠近0，同样可以证明分类信号对于增大类间距离有着显著的作用。

此外由于测度学习比对问题是一个典型的不平衡问题，因此如何对负样本对进行采样对训练结果通常会产生很大的影响。针对数据不平衡问题，我们在构成训练集时选择WDRef数据集可生成全部正样本对作为训练集的正样本数据，同时设置比例为1:1, 1:5, 1:10分别生成负样本对构成三个不同的训练集。如图 4-4所示，我们可以发现HDML算法对于不平衡训练集问题有很好的适应能力，实验结果表明即使采样时损失部分负样本信息，HDML算法同样可以求解到一个较优解，这是因为HDML算法中分类信号可以帮助增加类间距离，而在测度学习算法中负样本的主要作用同样是增加类间距离，因此分类信号在一定程度上可以代替采样损失的负样本。

(a)

(b)

(c)

图 4-4 正负样本不均匀训练集时HDML算法性能。(a)WDRef训练集准确率趋势图； (b) WDRef验证集准确率趋势图；(c)LFW准确率趋势图。

* 1. 结论

1. 测度学习在图像检索中的应用
2. 结论

参考文献

1. Cover T M, Hart P E. Nearest neighbor pattern classification[J]. Information Theory IEEE Transactions on, 1967, 13(1):21-27.
2. Lloyd S P. Least Squares Quantization in PCM's[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1982, 28(2):129-136.
3. Xing E P, Ng A Y, Jordan M I, et al. Distance Metric Learning, with Application to Clustering with Side-information[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2002: 505-512.
4. Short R D, Fukunaga K. The optimal distance measure for nearest neighbor classification[C]. IEEE Transactions on Information Theory1981:622 - 627.
5. Hastie, T., & Tibshirani, R. Discriminant adaptive nearest neighbor classification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(6): 607-616.
6. Baxter, J., & Bartlett, P. The canonical distortion measure in feature space and 1-NN classification[C]. Advances in neural information processing systems, 1998: 245-251.
7. Weinberger K Q, Blitzer J, Saul L K. Distance metric learning for large margin nearest neighbor classification[C]. Advances in neural information processing systems, 2006:207-244.
8. Kilian Q Weinberger, John Blitzer, and Lawrence K Saul. Distance metric learning for large margin nearest neighbor classification[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2009, 10:207-244.
9. Kilian QWeinberger and Lawrence K Saul. Fast solvers and efficient implementations for distance metric learning[C]. Proceedings of the 25th international conference on Machine learning, ACM, 2008: 1160-1167.
10. Huyen Do, Alexandros Kalousis, JunWang, and AdamWoznica. A metric learning perspective of SVM: on the relation of LMNN and SVM[C]. In Proceedings of the 15th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS), 2012: 308–317.
11. Jason V Davis, Brian Kulis, Prateek Jain, Suvrit Sra, and Inderjit S Dhillon. Information-theoretic metric learning[C]. Proceedings of the 24th international conference on Machine learning, ACM, 2007: 209-216.
12. Guo-Jun Qi, Jinhui Tang, Zheng-Jun Zha, Tat-Seng Chua, and Hong-Jiang Zhang, An efficient sparse metric learning in high-dimensional space via l1-penalized log-determinant regularization[C]. Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning, ACM, 2009: 841-848.
13. Fei-Fei Li and Pietro Perona. A Bayesian Hierarchical Model for Learning Natural Scene Categories[C]. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005:524–531
14. Jerome Friedman, Trevor Hastie, and Robert Tibshirani. Sparse inverse covariance estimation with the graphical lasso[J]. Biostatistics 9, 2008, no. 3: 432-441.
15. Matthew Schultz and Thorsten Joachims. Learning a Distance Metric from Relative Comparisons[C]. In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS) 16, 2003.
16. Steven C. Hoi, Wei Liu, Michael R. Lyu, and Wei-Ying Ma. Learning Distance Metrics with Contextual Constraints for Image Retrieval[C]. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2006: 2072–2078.
17. Sumit Chopra, Raia Hadsell, and Yann LeCun. Learning a Similarity Metric Discriminatively with Application to Face Verification[C]. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005: 539–546.
18. Brian McFee and Gert R Lanckriet, Metric learning to rank[C]. Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-10), 2010: 775-782.
19. Daryl Lim, Gert Lanckriet, and Brian McFee, Robust structural metric learning[C]. Proceedings of The 30th International Conference on Machine Learning, 2013: 615-623.
20. Bengio Y, Lecun Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series[J]. The Handbook of Brain Theory & Neural, 1997.
21. Mensink T, Verbeek J, Perronnin F, et al. Metric Learning for Large Scale Image Classification: Generalizing to New Classes at Near-Zero Cost[M]. Computer Vision – ECCV 2012 Springer Berlin Heidelberg, 2012:488-501.
22. Andrea Frome, Yoram Singer, Fei Sha, and Jitendra Malik. Learning Globally-Consistent Local Distance Functions for Shape-Based Image Retrieval and Classification[C]. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2007: 1–8.
23. Nair V, Sellamanickam S, Mahajan D, et al. Learning hierarchical similarity metrics[C]. 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern RecognitionIEEE, 2012:2280-2287.
24. Guillaumin M, Verbeek J, Schmid C. Is that you? Metric learning approaches for face identification[J]. Proceedings, 2009, 30(2):498 - 505.
25. Xi Li, Chunhua Shen, Qinfeng Shi, Anthony Dick, and Anton van den Hengel. Nonsparse Linear Representations for Visual Tracking with Online Reservoir Metric Learning[C]. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012: 1760–1767
26. Matthieu Guillaumin, Thomas Mensink, Jakob J. Verbeek, and Cordelia Schmid. TagProp: Discriminative metric learning in nearest neighbor models for image auto-annotation[C]. In Proceddings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2009:309–316..
27. M. Ehsan Abbasnejad, Dhanesh Ramachandram, and Mandava Rajeswari. A survey of the state of the art in learning the kernels[J]. Knowledge and Information Systems (KAIS), 2012, 31 (2):193–221.
28. Mehmet G¨onen and Ethem Alpaydin. Multiple Kernel Learning Algorithms[J]. Journal of Machine Learning Research (JMLR), 2011, 12:2211–2268
29. Maaten L J P V D, Postma E O, Herik H J V D. Dimensionality reduction: A comparative review[J]. Journal of Machine Learning Research, 2007, 10.
30. Ali M. Qamar and Eric Gaussier. Online and Batch Learning of Generalized Cosine Similarities[C]. In Proceedings of the IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), 2009: 926–931.
31. Hieu V. Nguyen and Li Bai. Cosine Similarity Metric Learning for Face Verification[C]. In Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer Vision (ACCV), 2010: 709–720.
32. Wu, X., Shi, Z. G., & Liu, L. Quasi Cosine Similarity Metric Learning[C]. In Computer Vision-ACCV 2014 Workshops. Springer International Publishing, 2014: 194-205
33. Burges C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[C]. Data Mining and Knowledge Discovery 1998.
34. Bousquet O, Bottou L. The tradeoffs of large scale learning[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2008:161--168.
35. Zhu C. L-BFGS-B - Fortran Subroutines for Large-Scale Bound Constrained Optimization[J]. Acm Trans.math.software, 1999, 23(4):550-560.
36. Huang G B, Mattar M, Berg T, et al. Labeled Faces in the Wild: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments[J]. Workshop on Faces in 'Real-Life' Images: Detection, Alignment, and Recognition, 2007.
37. Perronnin F, Dance C. Fisher Kernels on Visual Vocabularies for Image Categorization[C]. 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern RecognitionIEEE Computer Society, 2007:1-8.
38. Perronnin F, Sánchez J, Mensink T. Improving the Fisher Kernel for Large-Scale Image Classification[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6314:143-156.
39. Perronnin F, Liu Y, Sanchez J, et al. Large-scale image retrieval with compressed Fisher vectors[C]// 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern RecognitionIEEE, 2010:3384-3391.
40. Simonyan, K., Parkhi, O.M., Vedaldi, A., Zisserman, A.: Fisher vector faces in the wild[C]. In: Proc. BMVC. Volume 1. 2013.
41. Wolf L, Hassner T, Taigman Y. Similarity Scores Based on Background Samples[M]. Computer Vision – ACCV 2009 Springer Berlin Heidelberg, 2010:88-97.
42. Guillaumin M, Verbeek J, Schmid C. Is that you? Metric learning approaches for face identification[J]. Proceedings, 2009, 30(2):498 - 505.
43. Ying, Y., & Li, P. Distance metric learning with eigenvalue optimization[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2012, 13(1): 1-26.
44. Cao Q, Ying Y, Li P. Similarity Metric Learning for Face Recognition[C] 2013 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) IEEE Computer Society, 2013:2408-2415.
45. Li P, Fu Y, Mohammed U, et al. Probabilistic Models for Inference about Identity[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 2011, 34(1):144-157.
46. Chen D, Cao X, Wang L, et al. Bayesian Face Revisited: A Joint Formulation[M]. Computer Vision – ECCV 2012Springer Berlin Heidelberg, 2012:566-579.
47. 1 C C. Support-Vector Networks[J]. Machine Learning, 1995, volume 20(3):273-297(25).
48. Freedman D A. Statistical Models: Theory and Practice[J]. Cambridge University Press Cambridge, 2005, 48(2):xiv+442.
49. Cutler D R, Edwards T C, Beard K H, et al. Random Forests for classification in ecology. Ecology[J]. Ecology, 2007, 88(11):2783-2792.
50. Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786):504-507.
51. Hinton G E, Osindero S. A fast learning algorithm for deep belief nets[C]// Neural Computation 2006:2006.
52. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012:2012.
53. Mignon A, Jurie F. PCCA: A new approach for distance learning from sparse pairwise constraints[C]. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern RecognitionIEEE Computer Society, 2012:2666-2672.
54. Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J, et al. Learning internal representation by back-propagation of errors[J]. Nature, 1986, 323(1116):533-536.
55. Glorot X, Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks[C], International Conference on Artificial Intelligence & Statistics Society for Artificial Intelligence & Statistics2010:249-256.
56. He H, Garcia E /. Learning from Imbalanced Data[J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2009, 21(9):1263-1284.
57. Jia, Y., Shelhamer, E., Donahue, J., Karayev, S., Long, J., Girshick, R., & Darrell, T. Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding[C]. In Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia, ACM, 2014:675-678.
58. Ojala T, Pietikäinen M, Mäenpää T. Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 24(7):971-987.
59. Cao Z, Yin Q, Tang X, et al. Face recognition with learning-based descriptor[C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference onIEEE, 2010:2707-2714.

作者简历及在学研究成果

1. 作者入学前简历

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 起止年月 | 学习或工作单位 | 备注 |
| 年月至年月 | 在攻读 |  |
| 年月至年月 | 在从事的工作 |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

**提示信息：**硕士入学前简历，根据自己情况填写，备注中填写职务等。

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

1. 在学期间从事的科研工作

（应注明课题名称、参加身份、通过时间、通过方式、评定单位等）。不用此信息时，请删除本段。

1. 在学期间所获的科研奖励

（应注明奖励名称、授奖单位、授奖时间等，请填写科研方面奖励，请勿填写其他奖励信息，如不得填写三好研究生等奖励信息。）不用此信息时，请删除本段。

1. 在学期间发表的论文

（应按照参考文献的格式来填写，包括编号。并在后面依次标明以下事项，各项之间用“．”分隔：1）标明“已发表”或“已录用”；2）是否“SCI/EI/STP/CSSCI刊源”；3）是否被“SCI/EI/STP/CSSCI检索”；4）检索号。第2、3项请标明具体检索名称）。不用此信息时，请删除本段。

盲审论文，请隐去所有可能影响盲审结果的信息，诸如作者姓名、导师姓名、作者学号等，具体隐去方法请详见“学位论文工具栏”中的“常用工具”中的“盲审论文制作方法”，或查看本文档最后的论文编制指南中的“13盲审论文制作方法”。另外在此处，研究成果中论文作者的发表文章列表中应隐去所有作者的名字，只标明论文作者是第几作者，具体如“[第二作者]．论文名称．……”。不用此信息时，请删除本段。

独创性说明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得北京科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

本页的签名均应当是亲笔签名，不用输入，不用此信息时，删除此框。

签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

**（保密的论文在解密后应遵循此规定）**

签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

学位论文数据集

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **关键词\*** | **密级\*** | **中图分类号\*** | **UDC** | **论文资助** |
|  |  |  |  |  |
| **学位授予单位名称\*** | | **学位授予单位代码\*** | **学位类别\*** | **学位级别\*** |
| 北京科技大学  **提示：**  送交正式论文时，本页所有带星号的项目必须填写完整并确保正确。否则，可能重新制作并提交正式论文。  不需此提示时，请删除此提示框。  **学位类别：**请填写哲学、经济学、法学、教育学、文学、理学、工学、管理学等，详细请见[USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe](file:///C:\Users\a\AppData\Roaming\Microsoft\Word\USTB硕士学位论文规范及论文制作指南.exe)中的我校学科专业目录。  **学位级别：**请填写博士、硕士。  不用此提示时，请删除此信息提示框。  **提示：**  在答辩后给学校上交最终正式论文时，请删除本提示框并填写本页。  在答辩及答辩前，请保持本页及本框不变；建议将本页其他提示框删除。  填写此页时，请删除此信息提示框。 | | 10008 |  |  |
| **论文题名\*** | | **并列题名** | | **论文语种\*** |
|  | |  | |  |
| **作者姓名\*** |  | | **学号\*** |  |
| **培养单位名称\*** | | **培养单位代码\*** | **培养单位地址** | **邮编** |
| 北京科技大学 | | 10008 | 北京市海淀区学院路30号 | 100083 |
| **学科专业\*** | | **研究方向\*** | **学制\*** | **学位授予年\*** |
|  | |  |  |  |
| **论文提交日期\*** |  | | | |
| **导师姓名\*** |  | | **职称\*** |  |
| **评阅人** | **答辩委员会主席\*** | | **答辩委员会成员** | |
|  |  | |  | |
| **电子版论文提交格式** 文本（ ） 图像（ ） 视频（ ） 音频（ ） 多媒体（ ） 其他（ ） **推荐格式：**application/msword；application/pdf | | | | |
| **电子版论文出版（发布）者** | | **电子版论文出版（发布）地** | | **权限声明** |
|  | |  | |  |
| **论文总页数\*** |  | | | |
| 共33项，其中带\*为必填数据，为22项。 | | | | |

**提示信息：**带\*为必填数据，必填数据共22项。所填数据的格式为“宋体、五号”

不用此信息时，删除此框。

（鼠标移到此框四边，鼠标变为十字箭头，点击边框选中此框，然后按Del删除）

1. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Iris> [↑](#footnote-ref-1)
2. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Ionosphere> [↑](#footnote-ref-2)
3. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Wine> [↑](#footnote-ref-3)
4. <http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/> [↑](#footnote-ref-4)
5. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Diabetes> [↑](#footnote-ref-5)
6. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Ionosphere> [↑](#footnote-ref-6)
7. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Connectionist+Bench+%28Sonar%2C+Mines+vs.+Rocks%29> [↑](#footnote-ref-7)
8. <http://home.ustc.edu.cn/chendong/JointBayesian/index.html> [↑](#footnote-ref-8)