



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

孙伟伟 刘 春 姚连璧 著

基于流形学习的高光谱遥感影像 降维理论与方法研究

Theory and Methods of Dimensionality Reduction
Using Manifold Learning for Hyperspectral Imagery



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

孙伟伟 刘春 姚连璧 著

基于流形学习的高光谱遥感影像 降维理论与方法研究

Theory and Methods of Dimensionality Reduction
Using Manifold Learning for Hyperspectral Imagery

内 容 提 要

本书主要利用流形学习进行了高光谱遥感影像的降维研究,主要包括:高光谱影像的低维流形坐标的光谱意义解释;不同流形坐标所代表的高光谱影像中地物光谱特征差异分析;高光谱遥感影像的 UL-Isomap 降维算法及实验分析;高光谱遥感影像的 ENH-LTSA 降维算法及实验分析;联合 ILE 降维和 IKNN 分类器的高光谱影像分类。

本书研究结合高光谱遥感影像数据特征的流形学习方法提出了降维的改进模型,改善了流形学习降维的低维嵌入结果和计算速度,可以更好地指导后续的高光谱遥感影像分类、目标识别和异常检测等应用。

本书适用于测绘科学与技术、摄影测量与遥感等相关专业和领域的读者。

图书在版编目(CIP)数据

基于流形学习的高光谱遥感影像降维理论与方法研究 /
孙伟伟,刘春,姚连璧著. --上海:同济大学出版社, 2017.5

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6986-5

I. ①基… II. ①孙… ②刘… ③姚… III. ①光谱分
辨率-光学遥感-遥感图像-图像处理②光谱分辨率-光
学遥感-遥感图像-方法研究 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093793 号

基于流形学习的高光谱遥感影像降维理论与方法研究

孙伟伟 刘 春 姚连璧 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 李 杰 卢元姗

责任校对 徐逢乔 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 14

字 数 280 000

版 次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6986-5

定 价 88.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究



“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佶红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

高光谱遥感利用成像光谱仪可以获得地球表面上各地物的数十个至数百个波段的光谱特征,能够用来区分地物之间在原来多光谱影像中无法区分的细微差异。高光谱遥感目前广泛应用于海洋水质监测、植被覆盖制图、大气环境监测等多个领域,取得了遥感领域中前所未有的重大成就。相比多光谱影像,高光谱影像具有波段众多、光谱分辨率高、波段相关性强且数据冗余度高等特性,这些特性使得学者们在应用高光谱影像解决实际问题的同时,也广泛研究高光谱影像的数据处理问题。其中,由于波段相关性强和数据冗余度高,高光谱影像的降维成为影响后续的分类、目标识别和异常探测等研究的技术前提和重要工作基础。而且高光谱影像的特性也对传统的遥感影像处理理论提出挑战。因此,研究降维对高光谱数据处理的理论和实际应用具有重大的科学意义。

高光谱影像降维中,波段选择根据一定的度量准则能够选取合适的波段组合。然而,波段选择容易忽略其他波段的重要信息,而且选择的最佳波段组合随度量准则的不同差异很大。相比波段选择,线性特征提取方法能够更好地保留原始高光谱影像的重要信息。然而,线性方法的潜在线性假设模型与高光谱影像数据的非线性本质产生矛盾,因此并不

十分适用于高光谱影像。基于核的非线性降维方法,利用 Mercer 核及其对应的再生核希尔伯特空间,通过定义 Mercer 核隐式地定义特征空间来实现降维。然而,核函数通常只能通过经验来选取而且缺乏物理直观意义解释。

神经生理学研究发现,人的感知是以流形的方式存在,高维的人脸图像其实是由光线强度、人离相机的距离以及人的头部姿势等少数几个变量来控制的。在此基础上,学者们结合神经生理学和微分几何的研究成果,提出流形学习方法来研究高维数据的非线性降维问题。流形学习方法假设高维数据集均匀采样于统一的低维流形上,通过高维数据集的高效率降维可以发掘潜在的低维流形。高光谱影像作为典型的高维空间数据,由于双向反射分布函数效应、多重散射及像素成分的异质性等原因具有明显的非线性特征。因此,在充分分析国内外学者对于高光谱影像降维问题研究的基础上,本书从高光谱数据的非线性本质出发引入流形学习方法,研究适合高光谱影像数据特性的非线性流形学习降维理论和方法体系,目的在于指导后续的高光谱影像分类、目标识别和异常探测等应用。本书的具体研究内容如下:

(1) 高光谱影像的低维流形坐标的光谱意义解释

流形学习降维后,低维流形坐标能够保留原始影像中地物的光谱特征信息。当前研究侧重于流形学习降维方法的数学模型,没有认真剖析流形坐标和光谱特征的对应关系,这使得高光谱影像的流形学习降维缺乏理论支持。因此,本书研究高光谱影像的低维流形坐标的光谱意义解释,建立低维流形坐标与地物的光谱特征的对应关系,为高光谱影像的流形学习降维处理提供坚实的理论基础。

(2) 不同流形坐标所代表的高光谱影像中地物光谱特征差异分析

流形学习方法能够通过降维来保留影像内部各地物的光谱特征。



然而,流形学习方法的数学模型不同导致不同方法的低维流形坐标继承地物的光谱特征的能力不同。当前研究侧重于单一流形学习方法,没有认真分析过不同流形学习的嵌入结果所带来的原始影像中相同地物的光谱特征的差异。因此,在确定两种流形坐标代表相同的光谱意义解释的基础上,分析两种流形坐标的不同所带来的地物的光谱特征的差异,并用于提取在单一方法的低维流形图中无法得到的原始影像的潜在特征,从而进一步深化高光谱影像的流形学习降维理论。

(3) 结合高光谱影像特性的流形学习降维的改进模型

相比传统的多光谱影像数据,高光谱影像具有维数高、“图谱合一”和海量数据等特性。高维特性使得在流形学习降维中需要考虑像素点在高维空间的分布特征。“图谱合一”特性使得在流形学习降维中需要同时考虑高光谱影像的空间特征和光谱特征。海量数据特性使得在流形学习降维中需要考虑提高流形学习方法的计算效率。因此,本书研究结合高光谱影像数据特性的流形学习降维的改进模型,改善流形学习降维的低维嵌入结果和计算速度,目的在于更好地指导后续的分类、目标识别和异常检测等应用。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 高光谱影像降维	10
1.2.1 高光谱影像的数据表达	10
1.2.2 高光谱影像的高维特性	12
1.2.3 高光谱影像降维的理论必要性和可行性	13
1.3 国内外研究现状分析	17
1.3.1 高光谱影像的波段选择	17
1.3.2 高光谱影像的线性特征提取	20
1.3.3 高光谱影像的非线性特征提取	22
1.3.4 流形学习在高光谱影像数据处理中的应用	23
1.3.5 当前研究存在的问题	26
1.4 研究目标与研究内容	28



1.4.1	研究目标	28
1.4.2	研究内容	29
1.5	研究方法与总体技术路线	30
1.6	本书结构安排	32
第2章 流形学习理论		35
2.1	引言	35
2.2	流形与流形学习	36
2.2.1	流形中的一些数学定义	36
2.2.2	流形学习的定义	39
2.2.3	流形学习的分类	40
2.3	典型流形学习方法	41
2.3.1	等距映射方法	42
2.3.2	局部切空间排列方法	44
2.3.3	拉普拉斯特征映射方法	46
2.3.4	几种流形学习方法的对比	47
2.4	流形学习方法中主要参数	50
2.4.1	本征维数的估计	50
2.4.2	邻域选择及优化	54
2.5	本章小结	56
第3章 基于光谱意义解释的高光谱影像低维流形特征提取		57
3.1	引言	57
3.2	高光谱影像流形坐标的光谱意义解释	58
3.3	偏最小二乘法修复 Isomap 遗失点的流形坐标	61
3.3.1	偏最小二乘方法	62

3.3.2	偏最小二乘方法修复 Isomap 遗失点坐标的流程	63
3.3.3	实验分析	65
3.4	高光谱影像低维流形特征提取	74
3.4.1	Isomap 降维的参数选取	75
3.4.2	Isomap 提取低维流形特征的流程	76
3.5	实验分析	77
3.5.1	实验数据	77
3.5.2	阴影区域提取	79
3.5.3	靠岸浅水区域提取	81
3.5.4	讨论	84
3.6	本章小结	85
第 4 章	两种流形坐标差异提取高光谱影像的潜在特征	86
4.1	引言	86
4.2	流形坐标差异提取潜在特征的可行性分析	87
4.3	流形坐标差异图提取高光谱影像潜在特征	88
4.3.1	高光谱影像 Isomap 和 LTSA 降维	89
4.3.2	两种流形坐标的光谱意义解释的统一	90
4.3.3	两种流形坐标尺度和方向的统一	91
4.3.4	流形差异图的计算及特征提取	92
4.3.5	流形坐标差异图提取潜在特征的流程	93
4.4	实验分析	94
4.4.1	实验数据	94
4.4.2	靠岸的浅水区域提取	96
4.4.3	低分辨率道路提取	100
4.4.4	讨论	103

4.5	本章小结	104
第5章	高光谱影像的 UL-Isomap 降维	105
5.1	引言	105
5.2	带标志点的等距映射方法	106
5.3	基于矢量量化的标志点选取	108
5.3.1	随机标志点的不足	108
5.3.2	基于矢量量化的标志点	109
5.4	速度提升策略	113
5.4.1	随机映射	114
5.4.2	快速近似 k -邻域构建	114
5.4.3	快速随机低阶近似奇异值分解	115
5.5	高光谱影像的 UL-Isomap 降维算法	116
5.6	实验分析	119
5.6.1	实验数据	120
5.6.2	VQ 标志点对分类结果的影响	122
5.6.3	随机映射对高光谱数据的影响	125
5.6.4	UL-Isomap 的计算速度性能	126
5.6.5	UL-Isomap 的分类性能	129
5.6.6	快速近似 k -邻域构建对分类的影响	131
5.6.7	讨论	131
5.7	本章小结	133
第6章	高光谱影像的 ENH-LTSA 降维	134
6.1	引言	134
6.2	考虑空间特性的 k -邻域选取	135