

曹建芳 李艳飞◎著

古代寺观壁画

病害自动标定与虚拟修复方法研究



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

曹建芳 李艳飞◎著

古代寺观壁画

病害自动标定与虚拟修复方法研究



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

古代寺观壁画病害自动标定与虚拟修复方法研究 / 曹建芳, 李艳飞著. —北京: 知识产权出版社, 2019.9

ISBN 978-7-5130-6408-8

I. ①古… II. ①曹… ②李… III. ①寺庙壁画—修复—方法研究
IV. ①K879.415

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 182744 号

内容提要

本书围绕古代壁画的数字化保护展开研究, 以寺观壁画为例, 对壁画数据库集群的搭建、病害区域的自动标定、标定缺损区域的虚拟修复, 以及古代壁画智能修复原型系统的设计与开发等方面进行了探讨和研究, 系统地阐述了古代壁画病害自动标定和虚拟修复的关键技术。理论上, 对壁画病害区域自动标定和虚拟修复的原理进行了分析; 实践上, 设计开发了原型系统并进行了验证和分析, 为各类古代壁画图像的数字化保护提供了新的思路和途径。全书集理论、技术、方法及实践于一体, 具有较强的理论性和实践性, 反映了当前该领域的最新研究成果。

本书可作为计算机科学应用技术、信息科学、工程技术等专业的本科生及硕士研究生教材, 对相关领域的研究人员和工程技术人员也有重要的参考价值。

责任编辑: 张 珑

责任印制: 孙婷婷

古代寺观壁画病害自动标定与虚拟修复方法研究

GUDAI SIGUAN BIHUA BINGHAI ZIDONG BIAODING YU XUNI XIUFU FANGFA YANJIU

曹建芳 李艳飞 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

电 话: 010-82004826

社 址: 北京市海淀区气象路 50 号院

责编电话: 010-82000860 转 8363

发行电话: 010-82000860 转 8101

印 刷: 北京建宏印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

版 次: 2019 年 9 月第 1 版

字 数: 100 千字

ISBN 978-7-5130-6408-8

网 址: <http://www.ipph.cn>

<http://www.laichushu.com>

邮 编: 100081

责编邮箱: laichushu@cnipr.com

发行传真: 010-82000893

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 8

印 次: 2019 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

出版版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

寺观壁画是我国重要的文化遗产之一，蕴含着丰富的历史、文化及艺术信息，生动记录了各朝各代、不同民族的社会风貌，在历史、文化及艺术等领域具有非常重要的价值。寺观壁画主要存在于寺庙之内，以墙壁为载体，附着于墙上。历经千年后，大部分壁画已经存在不同程度的褪色、脱落、裂隙、霉变等病害，严重影响了壁画内容的完整和生命的延续。因此，关于壁画的保护，特别是计算机智能处理技术在壁画保护中的应用成为学者们的研究热点。在此背景下，古代壁画数字化传承与保护技术应运而生。它综合了人工智能、计算机视觉、模式识别、心理学和数据库管理等领域的的相关知识。对计算机智能信息处理技术在壁画数字化保护中的应用进行分析，旨在解决文化遗产领域传统的人工处理方法存在的问题，建立实用性更强的古代壁画数据库集群、病害自动标定和虚拟修复原型系统。

本书以山西寺观壁画为研究对象，针对对壁画内容影响极大的、损坏较

严重的寺观壁画脱落病害展开研究。利用数字图像处理技术,对壁画进行预处理,然后根据脱落区域的特点,提出脱落病害的自动标定与虚拟修复算法,最后完成壁画的虚拟修复,为壁画的实际修复提供了参考。书中首先介绍了数据库集群、负载均衡的相关技术,主要包括 MySQL Cluster 的特点及体系架构、NDB 存储引擎、负载均衡策略、Nginx 与 Keepalived 等,并完成了壁画数据库集群的设计、部署和测试。然后,针对寺观壁画脱落病害的标定问题,将脱落病害分为绘画层脱落和地仗层脱落两类,通过转换颜色空间,分别利用阈值分割和区域生长算法实现了两类脱落病害的自动标定;针对脱落病害的虚拟修复问题,以经典的块修复算法——Criminisi 算法为基础,通过分析壁画的结构特征,在待修复块优先权的计算中引入了结构张量,在匹配块的匹配准则中引入结构相关因子并使用了局部搜索策略,实现了脱落区域的准确、高效的修复。通过与传统标定、修复算法的对比,验证了本书提出的算法的高效性,同时也获得了较好的标定和修复效果。最后,将本书构建的壁画数据库集群作为数据源,以提出的自动标定与虚拟修复为核心算法,完成了壁画数据管理原型系统的开发。

全书共分为 6 章:第 1 章是绪论,介绍了古代壁画数字化保护的研究现状和本书的研究内容、组织结构;第 2 章介绍了古代壁画数据库集群的搭建;第 3 章探讨了寺观壁画脱落病害的分类和自动标定方法;第 4 章研究了改进的 Criminisi 算法对寺观壁画虚拟修复的方法;第 5 章对壁画脱落病害自动标定与修复系统的设计与实现进行了探讨;第 6 章对本书的研究工作进行了总结和展望。

值本书出版之际，我要感谢忻州师范学院计算机系的领导和老师们，在他们的支持、鼓励 and 帮助下，我顺利地完成了本书的撰写工作！

本书的出版得到了山西省高等学校人文社会科学重点研究基地项目（No.20190130）、山西省自然科学基金（No. 201701D121059）、山西省艺术科学规划课题（No. 2017F06）、忻州市平台和人才专项（No. 20180601）的资助，在此一并表示感谢！

本书中的一部分内容反映了古代壁画智能处理的最新研究成果、研究方法和研究动向，在理论体系和方法上均有创新，构建了古代壁画病害标定和修复关键技术分析的平台。本书可作为计算机应用技术、信息科学、工程技术等专业高年级本科生和研究生的教材，对相关领域的研究人员和工程技术人员也有重要的参考和使用价值。

由于作者才疏学浅，书中疏漏在所难免，恳请各位专家学者批评指正，提出宝贵意见。

曹建芳

2019 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 数字图像处理	4
1.2.2 壁画智能修复	7
1.3 本书主要工作	10
1.3.1 脱落病害的自动标定	11
1.3.2 壁画的虚拟修复	12
1.3.3 壁画数据库集群的设计及虚拟修复系统的实现	12
1.4 本书组织结构	12
1.5 本章小结	14
第 2 章 壁画数据库集群设计与实现	15
2.1 MySQL 集群	16

2.1.1	MySQL 集群简介	16
2.1.2	MySQL Cluster 特点	17
2.1.3	MySQL Cluster 的体系结构	18
2.1.4	NDB 存储引擎	20
2.2	负载均衡及相关技术	22
2.2.1	负载均衡简介	22
2.2.2	负载均衡策略	23
2.2.3	Nginx 服务器与 Keepalived	25
2.3	壁画数据库集群设计与实现	26
2.3.1	集群的设计	26
2.3.2	集群的搭建	27
2.4	壁画数据库集群测试	30
2.4.1	数据一致性	30
2.4.2	高可用性	31
2.4.3	高并发性	35
2.5	本章小结	36
第 3 章	寺观壁画脱落病害的自动标定	37
3.1	壁画脱落病害分类	38
3.2	绘画层脱落病害自动识别及标定	39
3.3	地仗层脱落病害自动识别及标定	41
3.3.1	TS-RG 算法	41
3.3.2	基于 TS-RG 算法的地仗层脱落病害自动识别及标定	43

3.4	实验结果与分析	48
3.4.1	绘画层脱落自动标定实验	48
3.4.2	地仗层脱落自动标定实验	50
3.5	本章小结	56
第 4 章	寺观壁画脱落病害的虚拟修复	57
4.1	Criminisi 算法介绍	58
4.2	结构张量与壁画构图	60
4.2.1	图像的结构张量	60
4.2.2	壁画的构图特征	61
4.3	ASB-LS 算法	62
4.3.1	优先权函数	62
4.3.2	自适应样本块	63
4.3.3	匹配块搜索策略	65
4.3.4	ASB-LS 算法描述	66
4.4	实验结果与分析	67
4.4.1	实际脱落壁画修复对比	68
4.4.2	人为破坏壁画修复对比	72
4.5	本章小结	75
第 5 章	壁画脱落病害自动标定与修复系统的设计与实现	77
5.1	系统开发工具及环境	77
5.2	系统架构	78
5.3	系统模块	79

5.3.1	系统管理模块	79
5.3.2	数据管理模块	82
5.3.3	壁画修复模块	85
5.4	本章小结	89
第六章	总结和展望	91
6.1	本书总结	91
6.1.1	寺观壁画脱落病害的自动标定	91
6.1.2	壁画脱落病害的虚拟修复	92
6.1.3	壁画数据库集群的设计及虚拟修复系统的实现	93
6.2	展望	93
参考文献		95

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

中国古代壁画起源于石器时代，发展于秦汉时期，兴盛于隋唐、元代，明清时期开始没落。壁画的发展贯穿了整个中华民族五千年的历史。按照壁画的依托形式可将其分为寺观壁画、石窟壁画和墓室壁画三大类，其中古代寺观壁画作为主要的文化遗产之一，蕴含着大量的历史、文化、艺术信息，形象地记载了各个朝代和不同民族的社会风貌，具有重要的历史、科学和艺术价值^[1]。古代寺观壁画是画工直接将图案描绘在墙上的画，它以墙为载体，由支撑体、地仗层和绘画层构成^[2]。寺观壁画主要依附于古代寺庙建筑，寺观壁画的支撑体主要是建筑物的墙壁、岩体等，绘画层主要由颜料组成，由于支撑体表面一般都是凹凸不平的，所以经常在支撑体和颜料层之间加上地仗层，便于绘画层的依附。

素有“中国古代建筑宝库”之称的山西，以现存佛教寺庙和道观而论，数量之多和历史之久是全国仅见的^[3]。山西至今发现并仍然保存较好的古代壁画，总面积多达 2.5 万余平方米。现存壁画中，分量最重、数量最多的当数寺观壁画^[4]。山西五台山作为世界五大佛教圣地之一，其现存壁画量居省内各地区之首，计有 8 个朝代的 2380.01 平方米，最早的壁画距今已有 1200 多年^[5]。但由于历史、气候环境等原因，各寺观的壁画都存在不同程度的褪色、脱落、裂隙、起甲、烟熏、霉变、空鼓等现象，其中脱落病害最为严重，亟待保护^[6]。脱落病害不仅使得壁画内容受损，极大影响了参观者的视觉体验，更是壁画等艺术作品类文化遗产破坏的开始，如果得不到及时的保护，将来可能出现更严重的破坏，如酥碱、起甲、断裂等病害的侵蚀。图 1.1（另见文后彩图）中给出了寺观壁画典型的 4 种病害示例。

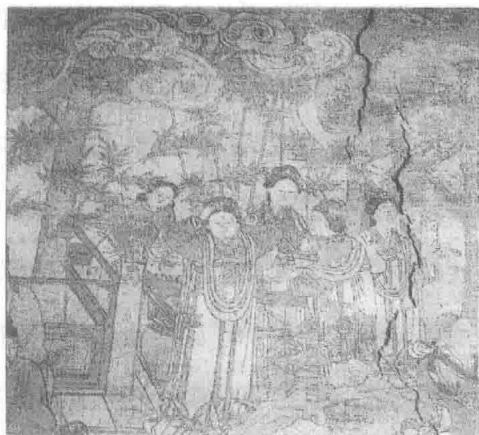
壁画保护一直是现代文物保护单位的一大难题，古壁画保护的目的就是延长壁画的生命，使人类文化遗产能够得到延续。古壁画保护工作主要包括两个方面：壁画病害治理和壁画修补^[7]。古壁画病害治理，主要是通过考古专业人员或者壁画研究人员到现场对壁画的损坏状况进行调查、统计，并对统计数据进行总结入库，形成分析数据。古壁画修补，主要是通过专业人员到现场对壁画进行加固、修补，去除壁画表面的附着物等。

许多文物保护者表示，由于壁画相关资料的杂乱、缺乏，壁画文物保护工作面临许多困难，动手修复过程更是难上加难。

上述古代壁画保护手段要求保护工作者不仅要掌握原始壁画各方面的信息，还要具备扎实的人文、美术、考古等基础知识，这种方法不但效率低而且因人



(a) 开化寺宋代壁画褪色



(b) 广胜寺元代壁画裂隙



(c) 开化寺宋代壁画起甲



(d) 开化寺宋代壁画脱落

图 1.1 寺观壁画典型病害图 (另见文后彩图)

工修复过程中的失误,可能对壁画造成更大的伤害。面对如此丰富、珍贵的文化遗产,如何做好遗产保护修复工作,让其永葆光彩,不仅是文物保护者的职责,更需要引起全社会的重视。近年来,随着信息技术的发展,图像处理、海

量数据存储等技术也被广泛应用到古代壁画保护当中。在利用计算机技术辅助古代壁画保护的过程中,图像处理技术应用最广也最成功,壁画病害的标定及虚拟修复逐渐成为一个研究热点。本课题的研究目的是探索数字图像处理技术在壁画修复中的应用,研究壁画图像中脱落病害的自动标定以及虚拟修复算法,同时利用数据库集群技术存储大量有关壁画的结构、非结构化数据。这不仅使壁画能够虚拟展示,同时也为壁画的实际修复提供了参考,使得壁画实际修复后看起来更自然、更接近创作者的真实意图。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 数字图像处理

数字图像处理是利用计算机对图像进行去噪、增强、复原、分割、特征提取等处理的理论、方法和技术。一般情况下,图像处理是用计算机和实时硬件实现的,所以也被称为计算机图像处理^[8]。其发展始于20世纪20年代,但由于当时技术的限制,随后的发展比较缓慢,直到20世纪60年代,首台能够执行数字图像处理任务的计算机问世,才实现了真正意义上的图像处理。美国喷气推进实验室在1964年对航天探测器传回的月球照片采用了数字图像处理技术,得到了较为清晰的月球表面形貌照片,这次实践也促进了数字图像处理这门学科的诞生^[9]。后来离散数学出现,又为数字图像的处理提供了有力的工具。

20 世纪 70 年代,随着计算机轴向断层技术的发明,CT 装置作为数字图像处理技术在医疗领域的应用日渐成功。20 世纪末,研究者们对图像的处理从二维进入三维领域,同时对图像处理的实时性、网络化、智能化提出了要求。近年来,随着计算机技术的飞速发展,以及图像处理理论和方法的不断完善,数字图像处理不但广泛应用于生物医学、航天遥感、工业工程、无人驾驶、人工智能等科学研究领域,甚至已经渗透到生活的各个角落。

数字图像区域标定,主要采用图像分割的思想。徐贵力等^[10]使用彩色图像颜色和纹理特征对番茄缺素病害进行分析,提取番茄缺素病害区域。耿长兴等^[11]将色度和纹理知识应用于黄瓜霜霉病害的特征提取,为黄瓜霜霉病害的识别提供了很大的帮助。胡伟平等^[12]联合使用阈值分割和区域生长算法进行了车牌的定位,使用垂直投影法进行了字符分割,并使用字符模板匹配的方法实现了车牌字符的准确标定。王建伟等^[13]将基于四元数矢量积性质的区域生长算法应用到复杂背景彩色图像中,实现了区域和对象的准确分割。姜伟等^[14]、Ma 等^[15]利用区域生长算法对彩色遥感图像、医学图像进行了分割,降低了计算复杂度,同时获得了较好的分割效果。

图像修复问题早在 20 世纪 90 年代就被提出,但一直很少有人重视,直到 21 世纪初才受到广泛关注,各种修复算法层出不穷。依据待修复块的大小,Guillemot 等^[16]将数字图像修复技术分为两类,一类是 Bertalmio 等^[17]提出的基于偏微分方程(PDE)的数字图像修复算法,该算法对处理图像中的划痕等小尺度破损有较好的复原效果,然而当破损区域较大或周围的纹理非常丰富时,修复效果较差。另一类是 Criminisi 等^[18]提出的基于样本块的修复算法,该算

法适用于大面积破损区域的修复,效果令人满意。其中基于纹理块的样本修复算法应用最为广泛,发展空间较大,得到了众多学者的关注。

2004年,Criminisi等提出的基于图像块样本纹理合成的图像修补方法比较经典;Criminisi算法虽然在图像修补领域是一种经典算法且适用于壁画脱落区域的修复,但是仍然存在不足。目前大量的研究者对其进行了优化改进。Zhang等^[19]在Criminisi算法的基础上优化了匹配块的复制过程。Zhu等^[20]对Criminisi算法中目标块选择的大小进行了优化。Xue等^[21]对Criminisi算法中块匹配所使用的匹配准则“对应像素误差平方和最小”进行了优化,提出使用颜色梯度进行块匹配,取得了不错的修补效果。梁淑芬等^[22]将优先权计算的方式由数据项和置信度项相乘改为相加的形式,并添加正规化因子;刘业妃等^[23]将置信度项修改为指数的形式以平缓其迅速下降为零的趋势,并添加可供用户选择的正规划因子。这两种改进算法对结构简单的破损图像修复效果较好,但修复纹理较丰富的图像时会出现结构不连续的现象。

针对结构不连续的现象,Liu等^[24]通过引入结构张量来构建局部结构度量函数,以此来优化优先权函数,并且提出了一种新的匹配准则。该算法对图像的强边缘结构进行修复时有较好的保持。但是在修复弱边缘结构时出现了结构断裂的现象。Siadati等^[25]通过结合图像的结构张量和梯度来更加准确地区分图像的显著结构,并通过定义新的优先级函数使图像的结构部分优先修复。不过该算法在修复复杂结构时效果并不理想,运行时间也很长。Alilou等^[26]通过预先设定最优距值来减少匹配块之间的计算,这种做法虽然降低了算法的时间复杂度,但会出现错误匹配块。

文物保护工作者在多年的工作实践中发现,文物修复和图像修复在很大程度上存在相同之处,利用这些共同之处结合图像分割、增强与目标移除等数字图像技术来进行文物虚拟修复,有效避免了修复中对文物造成的破坏。不过目前我国对这一技术的研究还处于起步阶段,文物信息的数字化、规范化等一系列信息化系统还不够完善。但是随着海量数据存储、深度学习、数字图像修复等技术的发展,数字图像处理在文物领域的应用将有更广阔的前景。

1.2.2 壁画智能修复

1. 壁画数字化

古代文物数字化是现代计算机技术、信息、网络 and 多媒体等技术在文物保护工作中的综合应用。计算机技术应用于考古学和文物保护领域的研究始于 20 世纪 50 年代,美国学者首次把计算机技术应用于民族部落研究。20 世纪 70 年代我国学者将计算机技术应用到文物保护领域。此后,文物数字化作为一种新技术被越来越多的国家和文物保护单位所使用^[27]。古壁画的数字化技术最主要的步骤就是古壁画图像的数字化采集,主要是采用高分辨率的专业数码相机拍摄而获得。古壁画数字化以后,就可以脱离文物本体而独立存在,同时壁画的信息通过现代化的数字技术得以永久保存。对古壁画运用数字化技术不仅改良了以往常规的壁画管理技术手段和管理方式,也为古壁画保护与管理工提供了有效的技术支撑,实现了对古壁画资源科学、动态的管理^[28]。