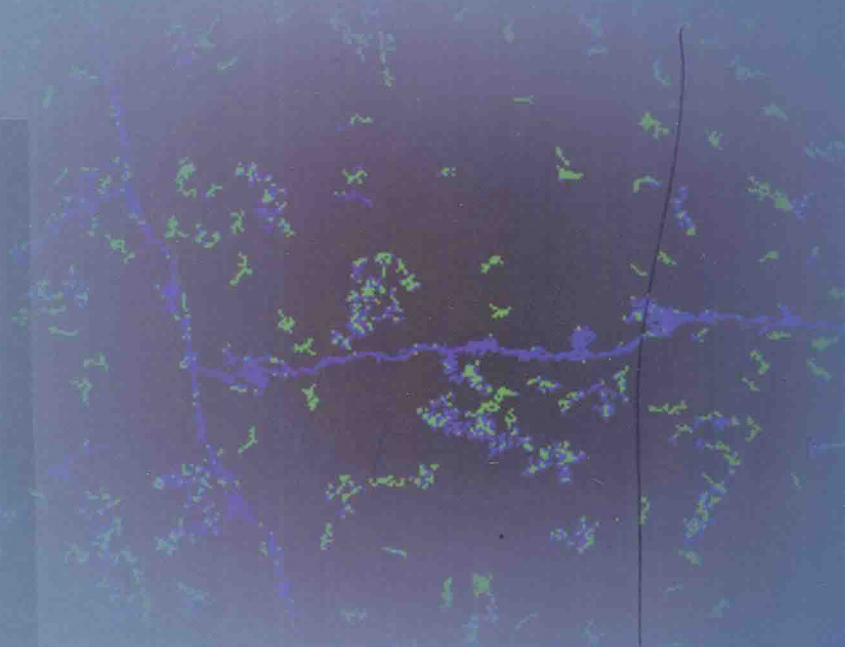


基于图像处理的裂缝 检测技术

瞿中 著



科学出版社

基于图像处理的裂缝检测技术

瞿 中 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以图像裂缝检测原理与应用为主题,借鉴国内外图像裂缝检测经典算法,对相关图像裂缝检测理论进行探讨,提出各种改进的高效快速全景图像拼接与图像裂缝提取相结合的裂缝检测技术,详细介绍图像序列裂缝配准方法、图像序列裂缝融合、图像序列裂缝全景拼接、图像裂缝检测、图像裂缝细化及连接、图像裂缝分析等知识。本书以理论分析为基础,并结合相关应用领域,验证本书算法的良好性能。本书所有实验分析均出自作者所在研究团队对研究工作的总结,具有一定的前沿性和实用性。

本书既可供相关工程师及应用开发人员阅读参考,还可作为高等院校图像处理、计算机视觉等专业课教材或教学参考书,也可作为计算机科学与技术、软件工程、信息安全、网络工程、通信工程、电子信息工程、自动化、物联网工程等相关专业读者的数字图像处理类课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于图像处理的裂缝检测技术/瞿中著. —北京:科学出版社,2016.9
ISBN 978-7-03-049934-9

I. ①基… II. ①瞿… III. ①图像处理—应用—混凝土结构—建筑工程—裂缝—检测 IV. ①TU755-39 ②TU746.1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 222200 号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:左讯

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:15 彩插:2

字数:292 000

定价:95.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在对混凝土结构表面进行维护时,裂缝是最常见、最严重的病害之一,因此裂缝是评价混凝土结构表面质量的重要参数之一。从最初的人工裂缝检测,发展到现在的自动化裂缝图像判定,基于图像处理的裂缝检测技术得到快速发展,并在理论上取得了一些突破。遵循数字图像处理的方法,可以大大提高混凝土裂缝检测的效率和成功率,减少检测中出现的问题。本书的主要目的是研究基于图像处理的裂缝检测技术,涉及图像拼接及裂缝检测算法,为读者在相关技术领域的进一步学习和研究奠定基础。

在混凝土图像裂缝检测应用场景中,本书首先采用图像拼接技术将成像设备采集得到的图像序列拼接成全景图,为下一步裂缝检测提供研究样本,将裂缝重复检测的难点问题从裂缝检测问题中独立出来;然后将拼接好的图像裂缝进行裂缝检测,并将检测结果进行细化、连接等操作;最后对图像裂缝进行分析,为摸清后续的裂缝发展规律及建筑结构的修复、养护奠定基础。

本书详细介绍混凝土图像裂缝全景拼接及混凝土图像裂缝检测技术。在撰写过程中注重理论、方法与应用相结合,对相关技术算法进行全面的讲述,配有丰富的实验数据分析。此外,设计实现混凝土表面图像裂缝拼接系统及混凝土表面图像裂缝检测系统。

作者长期从事数字图像处理方面的研究工作,具有较强的科研开发能力,本书是在参阅大量国内外学术论文、著作的基础上进行撰写而成的。全书由瞿中撰写并统稿,白羚、卜玮、李秀丽、钟文年、鞠芳蓉、陈宇翔、林嗣鹏、郭阳、林丽丹、乔高元、姚路、蒋玉萍等研究生参与了实验分析、系统实现,在此表示感谢。

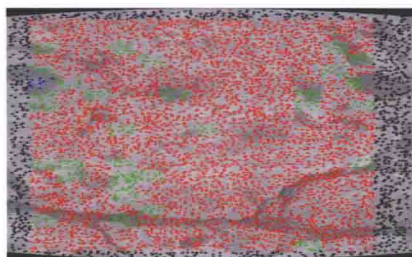
本书得到了重庆市科委基础科学与前沿技术研究重点项目(cstc2015jcyjBX0090)、重庆市研究生教育教学改革研究项目(yjg131002)和重庆邮电大学出版基金的资助。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正,并提出宝贵意见,以便进一步完善。可将您的宝贵建议和意见发送至 quzhong@hotmail.com。

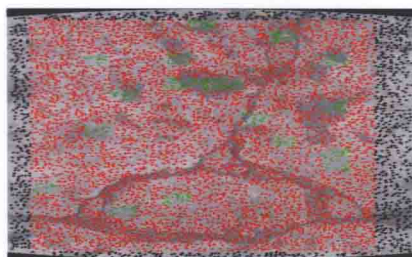
瞿 中

2016年6月

彩 图



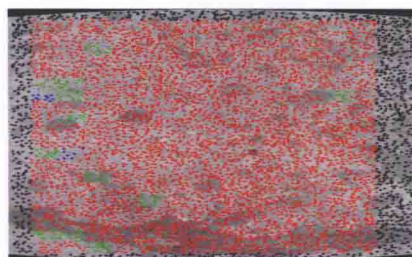
(a) 图 2.25(a)提取 SIFT 特征



(b) 图 2.25(b)提取 SIFT 特征

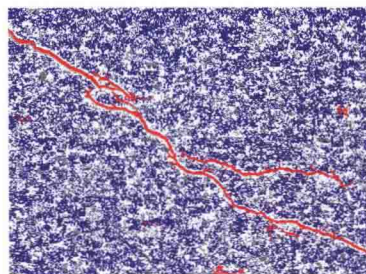


(c) 图 2.25(c)提取 SIFT 特征

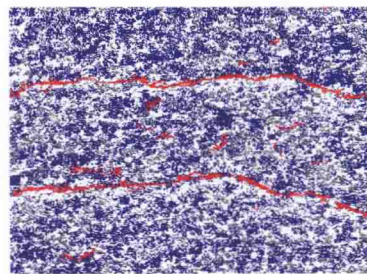


(d) 图 2.25(d)提取 SIFT 特征

图 2.26 SIFT 特征提取结果



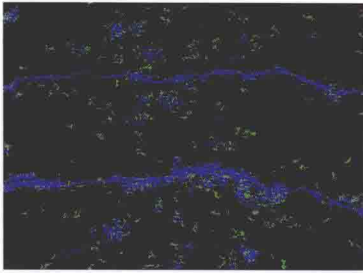
(i) 加速算法彩色标注图像 1



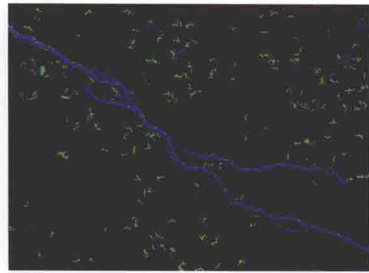
(ii) 加速算法彩色标注图像 2

(c) 加速算法处理得到的图像的彩色标注图像

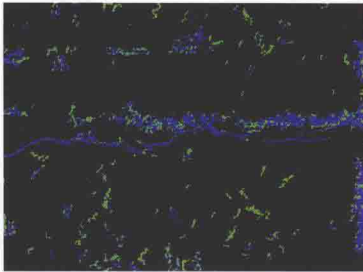
图 5.22 原算法与加速算法实验结果对比



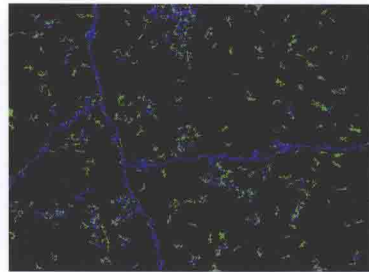
(i) 图像 3



(ii) 图像 6



(iii) 图像 7

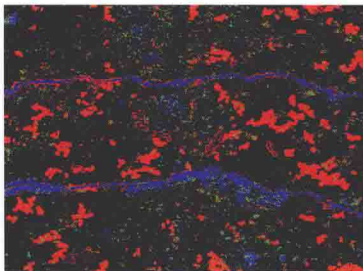


(iv) 图像 9

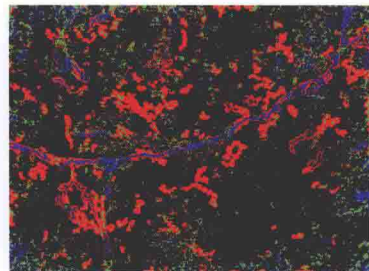
(e) 效率分析图

图 5.40 渗流处理结果(原始图像为图 5.30)

绿色: 渗流处理的像素点。蓝色: 原渗流算法中跳过的点。黑色: 没有经过渗流处理的像素点

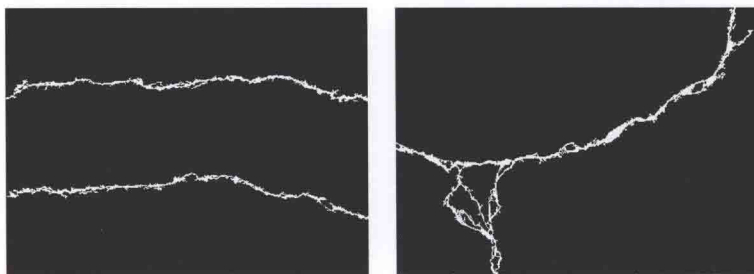


(i) 图像 3



(ii) 图像 10

(d) 实验结果分析图像



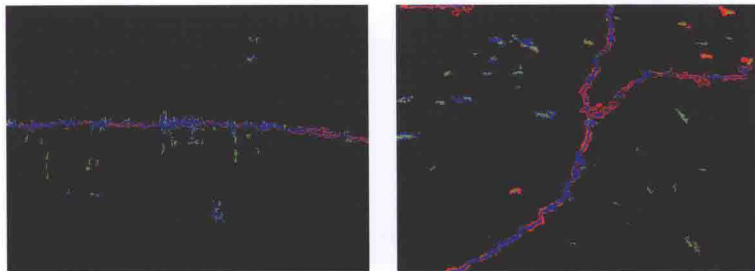
(i) 图像 3

(ii) 图像 10

(e) 人工提取的裂缝图像

图 5.43 高精确率算法实验结果

蓝色:5.3.3 节渗流算法加速的像素点。绿色:第一次渗流处理的点。红色:第二次渗流处理的点。黑色:未经过渗流处理的点



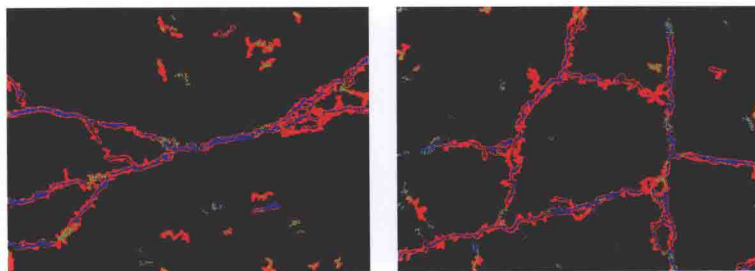
(i) 图像 1

(ii) 图像 2

(b) 实验结果分析图像

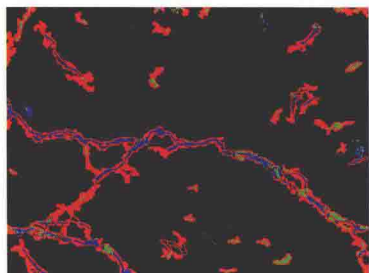
图 5.45 组合算法实验结果

蓝色:5.3.3 节渗流算法加速的像素点。绿色:第一次渗流处理的点;红色:第二次渗流处理的点。黑色:未经过渗流处理的点

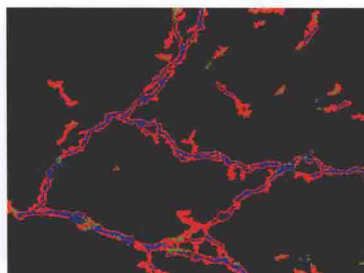


(i) 图像 11

(ii) 图像 12



(ii) 图像 13



(iv) 图像 14

(f) 实验结果分析图像

图 5.46 实验结果对比

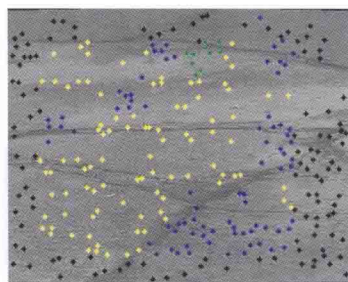
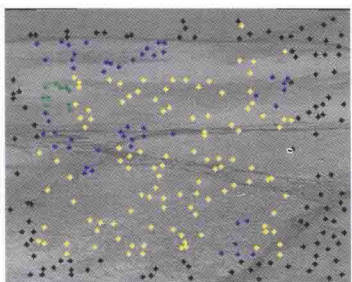


图 8.10 特征点检测后结果

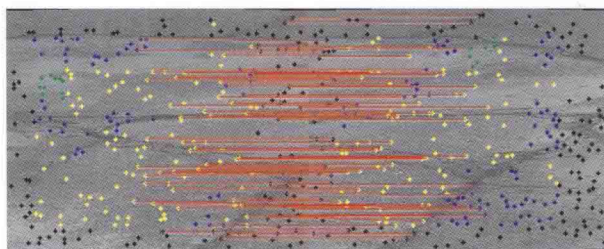


图 8.11 KD-Tree+BBF 算法后特征点匹配结果



图 8.12 RANSAC 算法提纯特征点后结果

目 录

前言

第 1 章 图像裂缝检测基础知识	1
1.1 裂缝检测的发展	1
1.2 基于数字图像处理的裂缝检测	5
1.3 图像裂缝检测难点	7
1.4 裂缝检测两大技术	10
1.4.1 图像拼接技术	10
1.4.2 裂缝检测技术	12
1.5 本章小结	14
参考文献	14
第 2 章 图像裂缝配准方法	19
2.1 图像预处理	19
2.1.1 图像去噪	19
2.1.2 图像修正	20
2.1.3 曝光调整	20
2.2 图像裂缝投影技术	22
2.2.1 平面投影	22
2.2.2 球面投影	23
2.2.3 立方体投影	23
2.2.4 柱面投影	24
2.3 图像变换	25
2.3.1 相机运动形式	25
2.3.2 图像变换矩阵	26
2.3.3 图像变换模型	26
2.4 基于 SIFT 特征的全景拼接图像配准方法	29
2.4.1 SIFT 特征检测算法	30
2.4.2 初始匹配的 KD-Tree	42
2.4.3 BBF 算法	45

2.5	RANSAC 算法	48
2.6	L-M 算法	52
2.6.1	传统的 L-M 算法	52
2.6.2	基于 Huber 函数的 L-M 算法	53
2.7	本章小结	54
	参考文献	55
第 3 章	图像裂缝融合方法	57
3.1	最优拼接缝优化算法	57
3.2	图像融合技术	59
3.3	基于非多分辨率分析的图像融合方法	60
3.3.1	直接平均融合法	61
3.3.2	加权平均融合法	61
3.3.3	中值滤波融合法	63
3.3.4	消除拼接缝的改进加权平均融合法	63
3.3.5	消除拼接缝的改进加权平均融合法的实验结果与分析	65
3.4	多分辨率融合算法	74
3.4.1	基于小波的图像融合技术	75
3.4.2	金字塔图像融合技术	75
3.4.3	拉普拉斯融合技术	76
3.4.4	其他金字塔融合	78
3.5	融合实验结果	79
3.6	本章小结	80
	参考文献	80
第 4 章	图像序列全景拼接技术	83
4.1	全景图像拼接算法	83
4.2	传统的全景拼接算法	85
4.3	新的全景拼接算法	87
4.3.1	基于预估重叠区域方法的全景拼接算法	87
4.3.2	基于动态规划输入的全景拼接算法	90
4.4	全景拼接实验结果与性能分析	93
4.4.1	基于动态规划输入的全景拼接算法实验结果	93
4.4.2	基于动态规划输入的全景图像拼接算法性能分析	97
4.5	本章小结	100
	参考文献	100

第 5 章 图像裂缝检测方法	102
5.1 基于阈值分割的图像裂缝检测算法	102
5.1.1 全局阈值分割法	102
5.1.2 迭代阈值分割法	104
5.1.3 Otsu 阈值分割法	104
5.2 形态学与区域生长相结合的图像裂缝检测算法	106
5.2.1 数学形态学	106
5.2.2 图像预处理	109
5.2.3 形态学和区域生长相结合的裂缝检测改进算法	111
5.2.4 裂缝检测改进算法性能分析	117
5.3 基于渗流模型的裂缝检测算法	119
5.3.1 渗流模型	119
5.3.2 基于终止-跳跃条件的渗流模型	120
5.3.3 基于渗流模型的图像裂缝检测算法	122
5.3.4 图像裂缝检测算法的性能分析	127
5.4 基于自适应预提取的高效裂缝检测算法	135
5.4.1 基于简单窗口的裂缝预提取算法	136
5.4.2 基于重叠窗口的裂缝预提取算法	141
5.4.3 基于重叠窗口的裂缝预提取算法性能分析	144
5.4.4 基于自适应预提取技术的高效裂缝检测算法	150
5.5 新的混凝土裂缝检测方法	155
5.5.1 高准确率裂缝检测算法	155
5.5.2 高效与高准确率相结合的裂缝检测算法	157
5.5.3 裂缝检测算法性能分析	157
5.6 本章小结	167
参考文献	167
第 6 章 图像裂缝细化及连接	169
6.1 图像裂缝细化算法	169
6.2 三种细化算法对比分析	174
6.3 图像裂缝形态学预处理	177
6.4 结合方向链码的并行细化后期处理算法	177
6.4.1 8 方向链码编码	178
6.4.2 单一像素宽度的骨架提取算法	179
6.4.3 骨架毛刺消除算法	181

6.4.4	细化算法性能分析	182
6.5	图像裂缝骨架提取与连接	187
6.5.1	一种基于图像裂缝骨架提取的连接算法	187
6.5.2	图像裂缝骨架提取与连接算法性能分析	188
6.6	本章小结	194
	参考文献	194
第7章	图像裂缝分析	195
7.1	图像裂缝分析的相关技术	195
7.2	基于种子填充法的单一裂缝提取	198
7.3	基于几何特征和图像投影的裂缝分类	200
7.3.1	裂缝粗分类	200
7.3.2	裂缝细分类	201
7.3.3	裂缝分类结果	202
7.4	特征参数的选取及计算	203
7.4.1	裂缝骨架的垂线法宽度计算	204
7.4.2	基于骨架的裂缝长度计算	204
7.4.3	基于像素统计的裂缝面积计算	205
7.4.4	裂缝的密度及重心计算	205
7.4.5	裂缝特征参数计算实验结果及性能分析	206
7.5	本章小结	213
	参考文献	213
第8章	系统设计与实现	215
8.1	图像序列裂缝拼接系统的设计与实现	215
8.1.1	图像序列裂缝拼接系统框架设计	215
8.1.2	图像序列裂缝拼接系统类与接口设计	216
8.1.3	图像序列裂缝拼接系统设计与实现	219
8.2	图像裂缝检测系统的设计与实现	225
8.2.1	图像裂缝检测系统框架设计	225
8.2.2	图像裂缝检测系统类与接口设计	227
8.2.3	图像裂缝检测系统设计与实现	229
8.3	本章小结	232

第 1 章 图像裂缝检测基础知识

本书主要介绍混凝土图像序列裂缝配准方法、混凝土图像序列裂缝融合方法、混凝土图像序列裂缝全景拼接技术、混凝土图像裂缝检测方法、图像裂缝细化及连接、图像裂缝分析及系统设计与实现。通过介绍图像拼接及裂缝检测技术，提出新的图像裂缝检测原理并进行应用设计。本书的总体框架如图 1.1 所示。本章通过介绍裂缝检测的发展，引入基于数字图像处理的裂缝检测技术，分析图像裂缝检测的难点。



图 1.1 基于图像处理的裂缝检测技术总体框架

1.1 裂缝检测的发展

近几年，我国公路、铁路、桥梁及隧道等交通基础设施建设飞速发展，据交通运输部统计，截至 2015 年，公路总里程达到 450 万公里，国家高速公路网基本建成，高速公路总里程达到 10.8 万公里，覆盖 90% 以上城镇人口超 20 万的城市；二级及以上公路里程达到 65 万公里，国、省道总体技术状况达到良好水平；农村公路总里程达到 390 万公里。截至 2014 年，我国桥梁已有 73.5 万座，共 4 万多公里；截至 2012 年年底，我国（不含香港、澳门和台湾地区）公路隧道有 10022 处，总长 8052.7 公里。交通基础设施的快速发展为人们的社会活动和日常生活提供便

利,同时也给交通运输服务保障及安全监管带来了前所未有的挑战^[1]。

在公路、桥梁及隧道等交通基础设施的建设中,混凝土发挥着重要作用,而在混凝土结构表面的维护中,裂缝是最常见、最严重的病害之一,因此裂缝是评价混凝土结构表面质量的重要参数之一,同时也是大部分病害的早期表现,对交通基础设施,如公路、桥梁、隧道等的使用寿命及行车安全会产生严重影响^[2]。传统的人工裂缝检测方法存在不足:

(1) 耗时、费力。随着公路、桥梁、隧道等交通基础设施的大规模建设,人工裂缝检测需要投入的人力、物力及时间不可估计,严重影响交通基础设施的维护和进一步的建设发展;

(2) 人工裂缝检测存在主观性,检测结果受检测人员、检测仪器的双重不定影响,导致测量结果不一致,检测不精确、差异大等;

(3) 人工检测影响正常交通,为车辆、行人的正常通行带来不便。

因此,人工裂缝检测越来越不利于公路、桥梁、隧道等的发展要求。

目前,世界各国都在不断探索和研究混凝土建筑维护问题,以提高建筑水平。早期的检测和维护主要依靠人工检测方式,当时的摄像技术还不成熟,需要维护人员进行现场勘查、测量,并手工记录检测结果。人工检测方式不仅耗时,而且花费大量的人力、物力和财力,同时存在检测精度低、检测结果受人为影响较大等缺点。而在隧道等半封闭场所人工检测还会影响正常的交通通行,严重时甚至会造成交通事故。随着科学技术的不断发展,各种新技术和新算法都逐渐运用于裂缝检测技术中。

目前主流的裂缝检测技术包括基于数字图像处理的裂缝检测技术、基于计算机断层扫描(computed tomography,CT)技术的裂缝检测技术、基于结构光的裂缝检测技术和基于超声波的裂缝检测技术等^[3]。

1. 基于数字图像处理的裂缝检测技术

基于数字图像处理的裂缝检测首先需要通过电荷耦合元件(charge coupled device,CCD)采集裂缝图像^[4],然后通过裂缝检测算法对采集到的图像进行检测分析,最终得到混凝土表面裂缝检测结果。该技术原理简单,性价比高,操作容易,近几年得到了长足发展^[5]。该技术的核心是裂缝检测算法,目前比较成熟的算法有基于阈值分割和边缘检测的裂缝检测算法^[6]、基于数学形态学的裂缝检测算法^[7]和基于渗流模型的裂缝检测算法^[8]等,具体算法将在后续章节中介绍。

2. 基于计算机断层扫描的裂缝检测技术

CT技术在医疗领域大放异彩之后,很多国内外学者开始研究CT技术在混凝土裂缝检测方面的应用^[9,10]。CT技术的工作原理是将X线从不同角度射向被

检测物体,然后利用专用的探测仪器记录衰减后的 X 线,并将探测到的信号传输到计算机,然后通过计算机分析检测数据,三维重建混凝土表面,并最终通过二维或三维灰度图像来输出检测结果,方便检测人员直观检测。CT 检测的技术原理如图 1.2 所示。

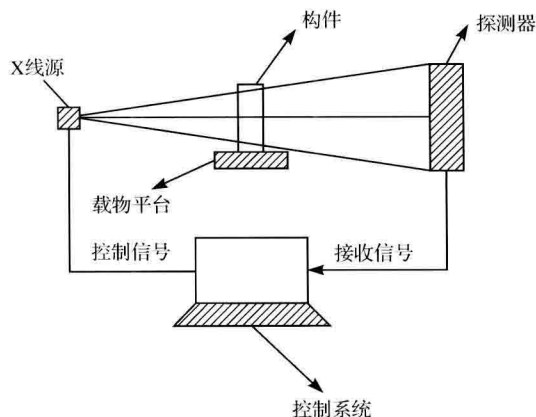


图 1.2 CT 检测扫描技术示意图

CT 技术具有以下优点:

(1) 检测精度高,通过对混凝土表面图像的三维重建,能够直观地检测混凝土内部结构,并且能够分层检测,精确定位病害位置;

(2) 检测范围广,不但能够检测混凝土表面裂缝,而且能够检测混凝土内部裂缝及其他混凝土病害;

(3) 不需要接触混凝土表面,对混凝土没有损伤。

CT 检测的缺点是:设备庞大,需要在混凝土两侧都安放检测仪器,因此无法检测路面或隧道内的混凝土裂缝,使用条件具有较大的局限性。

3. 基于结构光的裂缝检测技术

基于结构光的非接触测量技术是一种常用的裂缝检测技术。该技术的工作原理如图 1.3 所示,将线状的结构光投射到被测物体的表面上,由于物体表面高低不平或者存在裂缝,投射到物体上的光条会在凹陷或凸起处发生一定的变形,并产生阴影,然后利用电子光学传感器采集图像,通过计算机对光条图像进行分析,就能获得物体表面的三维信息^[11],最后对提取到的三维信息进行分析,获得物体表面裂缝所在的位置。基于结构光的裂缝检测技术的流程如图 1.4 所示。

由于结构光裂缝检测技术具有原理简单、检测精度高、受环境光影响较小、能够实时检测等优点,最近几年获得快速发展。

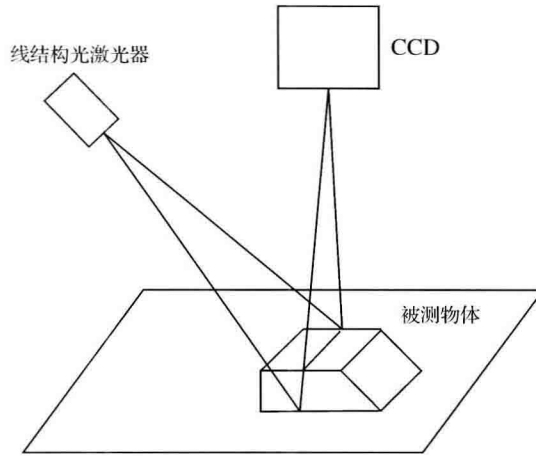


图 1.3 结构光检测技术示意图

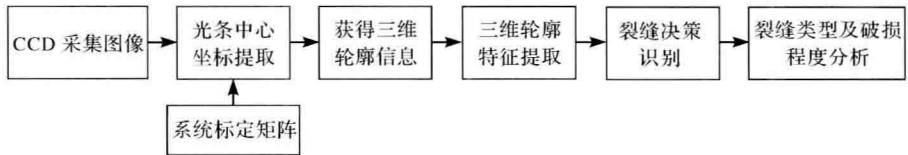


图 1.4 结构光检测步骤示意图

结构光检测法的缺点是：需要缓慢地在混凝土表面平行扫描，因此一般都需要车载检测设备。

4. 基于超声波的裂缝检测技术

超声脉冲技术运用在检测混凝土表面裂缝的历史虽然不长，但经过近几年的发展，已经取得了相当大的进步。超声波裂缝检测的基本原理是利用带波形显示功能的超声波检测仪和频率固定的声波转换器，通过测量并分析声波在混凝土中的传播速度、波幅和信号主频等数据，来判断混凝土中是否存在裂缝并判断裂缝的位置^[12]。该技术根据超声波在介质中传播时受分层界面的影响，造成超声波的反射、折射和衰减等现象，通过分析得到这些变化的规律，判断混凝土中是否存在裂缝及裂缝的深度。对于深度较浅的裂缝，可以通过平测法和双面斜测法来进行检测^[13]。通常，当存在裂缝的区域只有一个可测平面时，需要采用平测法，采用平测法时，需要在裂缝区域以不同的测距进行测试，并根据检测结果判断裂缝深度；当裂缝区域包含两个相互平行的可测平面时，需要使用双面斜测法进行检测。通过判断超声波频率和振幅的变化，可以判断待检测区域的裂缝是否连通，并且能

够判断裂缝深度。对于深度较大的裂缝,可以通过钻孔来检测裂缝深度。首先需要在裂缝两侧打眼,同时要保证眼孔的轴线平行,然后将超声波换能器插入孔洞中,并以相同深度缓慢向孔底移动,最后通过测试数据来分析裂缝的深度。

超声波检测的缺点是:超声波会受到混凝土中其他物体的干扰,例如混凝土中存在充水现象或者混凝土中的钢筋等都会对检测结果产生影响,同时混凝土本身材质密度不均匀,也会导致超声波检测的检测结果准确率不高。

1.2 基于数字图像处理的裂缝检测

图像裂缝检测的目的是使用某种裂缝检测技术对输入的混凝土表面图像进行实时处理,最终获取精确的裂缝图像,用于后续的裂缝分析,为进一步获取裂缝相关参数奠定基础。因此,图像裂缝检测算法的研究是混凝土图像裂缝检测系统中至关重要的一步,图像裂缝检测的精确性将直接影响获取的裂缝信息的准确性。

随着计算机信息产业技术的迅猛发展,自动化、智能化已经成为行业间发展、竞相突破的主要研究方向。与此同时,科技也推动着裂缝检测技术发展到了自动化的时代,智能路面图像裂缝检测车应运而生,在公路、桥梁、隧道等交通运输基础设施的自动监控与维护领域有着广泛的应用。对在复杂背景下拍摄的混凝土表面图像,采用图像裂缝检测技术提取裂缝,通过研究分析获得裂缝信息用于后期维护,是当前智能路面图像裂缝检测车开发领域中研究的热点^[14]。

在复杂背景下,利用图像裂缝检测技术实现裂缝的自动化检测,具有重大的理论意义和广泛的应用前景^[15,16]。图像裂缝检测的第一步是混凝土表面图像的采集,常用的多功能道路检测车如图 1.5 所示。



图 1.5 ARAN 多功能道路检测车

多功能道路测试车是一套模块化的数据采集平台,由一辆特别改装的汽车底盘和各种数据采集子系统组成。具体包括:道路几何参数测量系统、全球定位系