



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

洪中华 童小华 著

基于高分辨率卫星遥感的震害损失实物量 精细化评估理论与方法

Theory and Methods for Precise Assessment of
Earthquake-induced Disaster Damages Using High Resolution
Satellite Imagery



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

洪中华 童小华 著

基于高分辨率卫星遥感的震害损失实物量 精细化评估理论与方法

Theory and Methods for Precise Assessment of
Earthquake-induced Disaster Damages Using High Resolution
Satellite Imagery



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书以震害损失(房屋倒塌、铁路受损、人员伤亡)为研究对象,以三维震害精细化评估为研究目的,以地面监测数据和高分辨率卫星遥感影像为基础数据,以震害定位—提取—评估为研究主线,研究了基于高分辨率卫星遥感立体影像的立体定位偏差修正模型、基于高分辨率卫星立体影像的房屋倒塌三维评估、震后铁路受损评估、震后人员伤亡评估,形成了基于高分辨率卫星遥感立体影像的地震灾害损失实物量三维精细化评估理论和方法,开发了自主知识产权的地震灾害评估遥感处理系统。

本书可作为从事高分辨率卫星遥感和灾害损失实物量精细化评估方向研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于高分辨率卫星遥感的震害损失实物量精细化评估
理论与方法 / 洪中华,童小华著. — 上海: 同济大学出版社,
2017. 8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-7267-4

I. ①基… II. ①洪… ②童… III. ①高分辨率—卫星遥感—
应用—地震灾害—损失—评估 IV. ①P316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 189095 号

基于高分辨率卫星遥感的震害损失实物量精细化评估 理论与方法

洪中华 童小华 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 熊磊丽 助理编辑 翁 晗
责任校对 徐春莲 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 9.75
字 数 195000
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-7267-4

定 价 68.00 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	关侗红
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

我国是个地震多发国家,地震造成了房屋倒塌、道路损毁、人员伤亡等严重后果,而及时、有效的灾害损失实物量快速评估是实施震后救援和降低灾害损失的有效途径。灾害损失实物量评估是对受灾范围内房屋、基础设施、人口、产业、社会事业、居民财产、水域资源、土地资源等毁损实物数量和程度进行评估,本书主要研究对象是房屋倒塌、铁路受损、人员伤亡等实物量评估。

传统的灾害损失实物量评估方法主要是地方政府上报、实地调查的方式,然而该方法费时费力,难以完成灾区受损实物量的快速评估。随着遥感技术尤其是高分辨率卫星遥感技术的迅速发展和应用,利用遥感技术进行地震震害信息的获取与快速评估取得了丰富的成果,但是,现有的基于遥感变化检测技术提取的震害面积、位置等信息大多为平面二维信息,难以满足震区人员伤亡的准确评估,不利于震后医学救援物资和救护人员的科学调配,不利于灾后重建工作的高效推进。因此,需要发展更为准确的三维灾害受损实物量精细化评估理论与方法。三维精细化评估是利用三维信息对震害损失实物量进行评估,能更精确地反映房屋倒塌等震害损失实物量的程度,从而更准确地估算人员伤亡等情况。

三维灾害损失实物量精细化评估是基于高分辨率卫星遥感影像(High Resolution Satellite Imagery, HRSI)进行的。近年来,随着高分辨率卫星遥感的迅速发展,高分辨率卫星遥感构建了全天候、大范围、立体式的对地观测网络,已经初步具备震害损失实物量三维精细化评估的能力。本书提及的高分辨率卫星遥感包括高分辨率光学卫星遥感和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR),其中光学卫星遥感可提取清晰的震区震害信息,而 SAR 则不受恶劣天气的影响并能全天候工作,二者互为补充,可以提高震害损失实物量评估的实用化水平。

本书以震害损失实物量(房屋倒塌、铁路受损、人员伤亡)为研究对象,以三维震害精细化评估为研究目的,以地面监测数据和高分辨率卫星遥感(光学和 SAR)影像为基础数据,以震害定位—提取—评估为研究主线,研究了基于高分辨率卫星遥感立体影像(包括光学立体影像、SAR 立体影像、光学和 SAR 异源立体)的立体定位偏差修正模型、基于高分辨率卫星立体影像的房屋倒塌三维评估、震后铁路受损评估、震后人员伤亡评估,形成了基于高分辨率卫星遥感立体影像的地震灾害损失实物量三维精细化评估理论和方法,开发了自主知识产权的地震灾害评估遥感处理系统。其主要内容如下:

(1) 根据高分辨率卫星遥感(光学和 SAR)传感器的成像几何关系,研究了基于共线方程的高分辨率卫星光学遥感严格物理模型和基于距离-多普勒方程的 SAR 严格物理模型。同时,针对卫星传感器姿态和轨道误差等导致的立体定位系统性偏差问题,提出了基于平移、平移加比例、仿射变换、二次多项式四种偏差修正模型的有理函数模型光束法平差,减少了系统误差的影响,为高精度的灾害损失实物量三维精细化评估提供了理论基础。

(2) 根据高分辨率卫星遥感(光学和 SAR)的严格物理模型生成像

方或物方虚拟控制格网,建立了严格物理模型与通用有理函数模型的转换关系,构建了同源卫星(光学立体影像、SAR 立体影像)与异源卫星(SAR 和光学异源立体)遥感影像的联合定位框架,提出了同源和异源高分辨率卫星影像立体定位精度的提高模型,完善了震区多源遥感联合定位的理论与方法,提高了灾害损失实物量三维精细化评估理论的实用性。

(3) 提出了一种基于高分辨率卫星遥感立体影像的房屋倒塌三维灾害提取与精细化评估方法。该方法基于半全局匹配算法实现了立体影像的密集匹配,基于有理函数光束法平差生成震区三维密集点云进而得到高精度数字地表模型;然后根据震前、震后得到的数字地表模型差值法来提取出房屋倒塌的三维信息,最后根据震区震前、震后差值法提取了房屋倒塌的区域并评估了其三维倒塌的程度。

(4) 提出了一种基于震前、震后曲线变化的铁路受损评估方法。该方法根据震前的地形图数据利用最小二乘平差方法恢复了震前铁路曲线(直线、圆曲线、缓和曲线等)的几何参数,在高分辨率立体遥感影像提取的铁路曲线特征点的基础上,应用最小二乘准则建立震后铁路受损评估模型并实现了铁路受损评估模型的参数估计。在此基础上,根据震前、震后铁路曲线几何形态的变化评估了铁路受损的程度。

(5) 在提取了房屋倒塌三维信息后,提出了以房屋倒塌状态、房屋结构和人口密度为主要参数的人员伤亡预测模型,从而建立了基于高分辨率卫星遥感立体影像的震后人员伤亡精细化评估方法,为震后医学物资和救护人员的调配提供科学的决策依据。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 基于 HRSI 的灾害评估综述	2
1.2.1 星载高分辨率光学遥感的发展概况	3
1.2.2 星载高分辨率 SAR 的发展概况	4
1.2.3 基于 HRSI 的震害评估的发展概况	4
1.3 基于 HRSI 的震害实物量三维精细化评估综述	6
1.3.1 房屋倒塌三维提取与评估的研究现状	6
1.3.2 震后铁路受损评估的研究现状	7
1.3.3 震后人员伤亡评估的研究现状	7
1.4 基于 HRSI 的立体定位理论综述	9
1.5 目前研究中存在的问题	14
1.6 本书的研究内容与技术路线	15
1.7 本书的结构组织	16
1.8 本章小结	18

第 2 章	研究区域与数据预处理	19
2.1	研究区域	19
2.2	数据情况简介	20
2.2.1	震前、震后 IKONOS 数据和像控点	21
2.2.2	震前 1:500 地形图	24
2.2.3	震后 Cosmo-SkyMed 影像	24
2.2.4	震后 TerraSAR-X 影像	25
2.3	数据预处理	27
2.3.1	像点的选取与量测	27
2.3.2	坐标转换	27
2.4	本章小结	28
第 3 章	基于同源、异源的 HRSI 联合立体定位框架理论	30
3.1	HRSI 的严格物理模型	31
3.1.1	基于共线方程的光学影像严格物理模型	31
3.1.2	基于距离-多普勒方程的 SAR 影像严格物理模型	33
3.1.3	卫星几何误差	34
3.2	有理函数模型与偏差修正模型	35
3.2.1	有理函数模型与有理函数系数解算	35
3.2.2	基于有理函数模型的直接定位	38
3.2.3	基于偏差改正的 RPC 光束法平差	39
3.3	SAR 和光学卫星遥感联合定位模型	40
3.3.1	同源 HRSI 定位模型	40
3.3.2	异源 HRSI 定位模型	41
3.3.3	严格物理成像模型与有理函数模型转换	42
3.3.4	SAR 和光学卫星遥感联合定位	43
3.4	同源立体定位实验与精度分析	43
3.4.1	震前 IKONOS 立体定位试验与精度	44
3.4.2	震后 IKONOS 立体定位试验与精度	46

3.4.3	震前、震后 IKONOS 立体定位精度分析	46
3.5	异源 SAR 和光学影像联合定位实验与精度分析	48
3.6	本章小结	55
第 4 章	基于 HRSI 的震后房屋损失实物量三维精细化评估	56
4.1	房屋倒塌三维提取与评估框架	57
4.2	半全局立体匹配	59
4.3	单个房屋倒塌三维提取模型	59
4.4	区域房屋倒塌三维提取模型	60
4.5	房屋倒塌三维提取与试验	61
4.5.1	单个房屋倒塌三维提取与试验	61
4.5.2	区域房屋倒塌三维提取与试验	66
4.6	高分辨率卫星遥感地震灾害监测评估原型系统	74
4.6.1	主要功能模块	75
4.6.2	软件主界面	75
4.6.3	软件基本功能	76
4.6.4	软件特色功能	76
4.7	本章小结	78
第 5 章	基于 HRSI 的震后铁路损失实物量精细化评估	80
5.1	铁路受损实物量精细化评估模型	81
5.2	震前铁路曲线几何参数计算	81
5.2.1	直线误差方程	82
5.2.2	圆曲线误差方程	82
5.2.3	缓和曲线误差方程	83
5.3	震后铁路受损评估模型	85
5.3.1	震后铁路受损评估模型	85
5.3.2	震后铁路受损评估模型参数估计	86
5.4	都江堰铁路震害受损评估试验	98

5.4.1	都江堰震前铁路曲线几何参数计算	99
5.4.2	铁路曲线点平面坐标计算	100
5.4.3	都江堰震后铁路受损评估	100
5.5	本章小结	103
第6章	基于房屋倒塌信息的人员伤亡实物量精细化评估	104
6.1	震后人员伤亡实物量精细化评估	105
6.1.1	房屋倒塌受损信息提取	105
6.1.2	人员伤亡评估影响因子	106
6.1.3	人员伤亡预测模型	107
6.2	都江堰震后人员伤亡实物量精细化评估实验	108
6.2.1	实验数据	108
6.2.2	震后房屋倒塌提取	109
6.2.3	DI 和 MSI 计算	111
6.2.4	人员伤亡预测	111
6.3	本章小结	114
第7章	结论与展望	115
7.1	结论	115
7.2	创新点	117
7.3	展望	118
	参考文献	119
	后记	135