

STANDING TREE MEASUREMENT  
TECHNOLOGY AND METHOD BASED  
ON SMARTPHONE

# 基于智能手机的 立木测量技术与方法

徐爱俊 著



科学出版社

# 基于智能手机的立木测量 技术与方法

徐爱俊 著

本书受国家自然科学基金项目（项目编号：31670641）、浙江省重点研发计划项目（项目编号：2018C02013）资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从系统性角度出发,对基于智能手机的立木树高、胸径与冠幅等测树因子的测算进行理论、技术与方法研究,根据普通智能手机摄像头的结构特征和手机内置传感器的坐标系统原理,以手机摄像头和相关内置传感器为信息采集工具,结合近景摄影测量技术和计算机视觉技术自动测量单株或多株立木的树高、胸径与冠幅等测树因子,建立以信息技术为基础的立木因子自动测量技术与方法研究。

本书可作为高等学校计算机科学与技术、林业工程、森林经理学、森林保护、林业信息技术等专业或方向的高年级本科生、硕士研究生、博士研究生的教材或参考书,也可供相关领域科技工作者以及企事业单位工作人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于智能手机的立木测量技术与方法 / 徐爱俊著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-059821-9

I. ①基… II. ①徐… III. ①单株立木测定 IV. ①S758.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 270679 号

责任编辑: 王会明 / 责任校对: 王 颖

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 228 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135927-8022

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 前 言

森林资源数据的采集是森林资源监测与管理的重要工作之一。在各类森林资源调查工作中,测定立木的树高、胸径和冠幅等测树因子是其重要内容。对这些测树因子的测量,传统的方法耗资大、效率低且精度不高;随着科学技术的发展,相关精密仪器在森林调查中发挥了显著的作用,但却因技术操作、适用范围等限制,缺乏普适性。目前,国内外仍未找到一种快捷、简便、可靠的测量方法,相关科研人员和林业科技工作者一直在探索采用当今先进技术进行森林资源调查的方法,以适应当前“智慧林业”建设对森林资源调查工作的更高要求。随着信息技术的进步和智能终端软硬件系统的快速发展,采用智能手机获取立木的树高、胸径和冠幅等测树因子成为可能,也将在测树装备方面引起一场新的变革。

作者积累多年在智慧林业和计算机应用研究领域的成果与经验,并结合国内外智慧林业研究的最新成果撰写了本书,以供林业工作者和相关科研人员参考,希望起到抛砖引玉的作用。

本书根据普通智能手机摄像头的结构特征和手机内置传感器的坐标系统的工作原理,以普通智能手机摄像头作为信息采集工具,利用摄像测量学等技术,对单株或多株的立木树高、胸径和冠幅等测树因子进行自动测量,并以信息技术为基础对立木自动测量技术与方法进行研究。其主要研究内容有以下5个方面。

## 1) 研究带有非线性畸变参数的相机成像模型

通过分析智能手机的摄像机图像传感器、成像原理、对焦成像模块,研究摄像机成像模型中计算机图像坐标系、图像物理坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系之间的转换关系,分析手机摄像头在测量成像过程中的畸变问题,研究在中心透视投影模型中引入非线性畸变项消除或减少畸变误差,构建带有非线性畸变参数的相机成像模型。

## 2) 立木与智能手机之间的空间几何模型

根据立木的坐标位置、手机摄像头的坐标位置、手机与立木之间距离等因素,分析立木与手机之间的空间几何关系。

## 3) 研究基于智能手机建立测量单株立木树高和胸径的测量模型

(1) 利用手机内置的重力传感器的工作原理,实时获取手机的角度值。通过分析传感器的三维坐标系与手机的自然坐标系统之间的关系,研究获取手机的倾斜角度。

(2) 根据手机传感器和摄像头的工作原理,并结合倾斜角度自动测量立木间的距离。

(3) 通过自动获取的有效距离及已知的有效镜头焦距等自动获取相机参数。

(4) 利用得到的相机参数及设备预设参数，通过相机成像模型，可根据目标立木的图像信息，反算出单株立木的空间信息。

(5) 根据智能手机的自然坐标系统与立木的实际立体空间坐标关系，建立立木、手机位置、相机参数等因子的立木测量模型。通过该模型可以求解单株立木的树高、胸径和冠幅等测量值。

#### 4) 研究多株立木因子的自动测量模型

研究只需拍摄一幅图像就能测量出多株立木的树高、胸径和冠幅等信息，根据相机参数、有效距离、像素个数的比例关系等，建立立木因子测量模型（包括立木胸径、树高和冠幅测量模型），自动测量排列无序的多株立木的测树信息。

#### 5) 开发立木测量系统

在上述研究内容的基础上，开发基于 Android 系统的手机摄像，可实时获取测量参数，或获取图片，实现图像的导入、放大缩小、相机预设值、胸径计算、树高计算、冠幅计算及测量误差修正等基本功能的自动测量立木的原型系统。

本书适合作为计算机科学与技术、林业工程、森林经理学、森林保护、林业信息技术等专业或方向的高年级本科生、硕士研究生、博士研究生和林业科技工作者学习和研究的教材或参考书。为此，作者在叙述上力求通俗易懂、深入浅出。

参与本书撰写和实验的人员还有管昉立、武新梅、周素茵、周克瑜、阮晓晓、杨婷婷、高莉平、陈相武等，作者在此表示感谢。由于作者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 森林资源调查	1
1.2 立木因子测量	1
1.3 摄像测量学	2
1.4 关键技术及技术路线	3
1.4.1 基于智能手机的相机标定方法	3
1.4.2 基于 Graph Cut 算法的多株立木轮廓提取方法	3
1.4.3 基于 Mean-Shift 算法的立木图像分割方法	6
1.4.4 单株立木胸径测量方法	6
1.4.5 单目视觉系统被动测距方法	7
1.4.6 多株立木胸径测量方法	9
1.4.7 平面约束下的立木树高提取方法	10
1.4.8 单株立木树高测量方法	11
1.4.9 基于灭点原理的多株立木树高测量方法	13
1.4.10 多株立木树高和冠幅测量方法	15
1.5 本章小结	16
第 2 章 相关技术及实验环境	17
2.1 支撑技术概述	17
2.1.1 相机标定	17
2.1.2 距离测量	19
2.1.3 图像分割	20
2.1.4 数字摄影测量与计算机视觉	22
2.2 实验环境和软硬件支撑条件	23
2.2.1 Android 系统平台	23
2.2.2 系统架构及特性	23
2.2.3 智能手机的硬件	23
2.2.4 手机传感器	25
2.3 本章小结	25
第 3 章 智能手机相机标定方法	27
3.1 摄影测量基本成像模型	27
3.2 基于智能手机的改进相机标定方法	28

3.2.1	相机成像模型	29
3.2.2	相机非线性畸变优化模型	30
3.3	参数计算及优化	32
3.3.1	单应性关系与内参约束	32
3.3.2	L-M 算法非线性优化	32
3.3.3	畸变优化	32
3.4	标定参数精度对比验证	33
3.4.1	算法实现	33
3.4.2	实验结果与分析	34
3.5	本章小结	39
<b>第 4 章</b>	<b>基于视觉显著性及形态学的立木树干轮廓检测</b>	<b>40</b>
4.1	视觉显著性表达	40
4.1.1	颜色空间选取	40
4.1.2	基于 Lab 颜色空间的视觉显著性表达	41
4.2	色调分量均衡化与特征融合	42
4.2.1	色调特征提取	42
4.2.2	色调分量均衡化处理与特征融合	43
4.3	融合图像二值化	44
4.4	数学形态学处理	45
4.5	立木主轮廓提取	47
4.6	轮廓识别精度分析	47
4.6.1	图像采集及实验环境	47
4.6.2	立木树干轮廓分割结果	48
4.6.3	观察评价	49
4.6.4	性能指标评价	49
4.7	本章小结	50
<b>第 5 章</b>	<b>基于 Graph Cut 算法的多株立木轮廓提取方法</b>	<b>51</b>
5.1	材料和方法	51
5.1.1	立木图像采集	51
5.1.2	立木轮廓提取方法	51
5.2	立木图像分割	52
5.3	立木轮廓提取	55
5.3.1	边缘检测	55
5.3.2	轮廓提取	57
5.4	实验与结果分析	57
5.4.1	实验环境	57

5.4.2	立木分割结果	58
5.4.3	分割指标评价	60
5.4.4	算法性能分析	61
5.5	本章小结	62
第 6 章	基于 Mean-Shift 算法的立木图像分割方法	63
6.1	立木图像分割原理	63
6.2	多角度立木图像抽象	64
6.2.1	背景平滑	64
6.2.2	冠层空洞模糊	65
6.3	多维自适应 Mean-Shift 算法立木聚类	67
6.3.1	多维特征自适应带宽	67
6.3.2	核函数	69
6.3.3	立木图像聚类分割实现	70
6.4	实验与结果分析	71
6.4.1	实验方法	71
6.4.2	结果与分析	72
6.5	本章小结	75
第 7 章	单株立木胸径测量算法	76
7.1	单位像素三维世界坐标系尺寸重建	76
7.1.1	单位像素三维尺寸重建算法	76
7.1.2	单位像素三维世界坐标系物理尺寸重建	77
7.2	树干高度检测	79
7.2.1	最小外接矩形提取及优化	79
7.2.2	树干高度计算	80
7.3	胸径测量算法	80
7.3.1	胸径测量高度定位	81
7.3.2	胸径像素获取	81
7.3.3	胸径计算	81
7.4	实验验证与分析	82
7.4.1	单位像素三维世界坐标系物理尺寸重建验证	82
7.4.2	树干高度测量精度对比	84
7.4.3	胸径测量精度对比	85
7.5	本章小结	86
第 8 章	单目视觉系统被动测距方法	87
8.1	单目视觉系统被动测距	87
8.2	标靶设计与角点检测	89

8.2.1	标靶设计	89
8.2.2	角点检测算法	90
8.3	基于单目视觉的被动测距模型	93
8.3.1	相关性分析	93
8.3.2	模型建立	95
8.4	实验验证与分析	99
8.4.1	实验设计	99
8.4.2	实验室环境测距	100
8.4.3	自然场景测距	102
8.5	本章小结	102
第 9 章	多株立木胸径测量方法	104
9.1	多株立木胸径被动测量原理	104
9.2	立木树干轮廓检测	106
9.3	立木胸径测量	107
9.3.1	建立立木胸径测量坐标系	108
9.3.2	立木胸径测量模型	109
9.4	实验验证与分析	112
9.5	本章小结	114
第 10 章	平面约束下的立木树高提取方法	115
10.1	参照物轮廓识别	116
10.2	灭点坐标检测	117
10.3	构建交比信息	119
10.3.1	平面线段长度计算	119
10.3.2	竖直平面上线段长度计算	120
10.4	实验验证与分析	123
10.4.1	方法实现	123
10.4.2	实验验证	123
10.5	本章小结	124
第 11 章	单株立木树高测量方法	125
11.1	图像感兴趣区域选取	125
11.2	立木图像畸变校正	127
11.2.1	非线性畸变校正模型	128
11.2.2	基于点运算的透视畸变校正模型	130
11.3	立木树高测量模型	132
11.4	实验验证与分析	133
11.5	本章小结	134

第 12 章 基于灭点原理的多株立木树高测量方法	135
12.1 立木图像处理与识别	135
12.1.1 图像非线性畸变校正	135
12.1.2 标定物特征点检测	136
12.1.3 立木轮廓垂直最值点识别	137
12.2 多株立木树高测量方法	139
12.2.1 设标立木树高测量	139
12.2.2 多株立木树高测量	141
12.3 实验与验证	144
12.4 本章小结	145
第 13 章 多株立木树高和冠幅测量方法	147
13.1 树高和冠幅测量原理	147
13.2 立木轮廓提取	149
13.3 基于智能手机的多株立木树高和冠幅测量方法	152
13.3.1 建立立木测量坐标系	152
13.3.2 深度提取模型	153
13.3.3 树高测量模型	153
13.3.4 冠幅测量模型	156
13.4 实验验证与分析	158
13.4.1 树高测量模型精度验证	158
13.4.2 立木冠幅测量模型精度验证	159
13.5 本章小结	159
第 14 章 立木测量系统开发	161
14.1 系统开发环境	161
14.1.1 环境配置	161
14.1.2 环境搭建	162
14.2 系统开发框架	162
14.3 系统数据流	164
14.4 系统功能模块设计	165
14.5 本章小结	168
参考文献	169

# 第1章 概述

在森林资源调查工作和管理工作中，森林资源数据的采集是森林资源监测与管理的重要工作之一，数据的采集方法是否合理以及数据采集的效率是否高效是我国现阶段林业信息化发展的重要内容（史洁青等，2017；赵芳等，2014）。在森林资源一类调查和二类调查工作中，立木因子测量是森林资源外业调查工作的重要内容之一，其中，测定立木的树高（tree height）、胸径（diameter at breast height, DBH）、冠幅（crown diameter）等测树因子是其重要的内容。对这些测树因子的测量，传统的方法大多需要人工读取并记录测量数据（孟宪宇，2013），耗资大、效率低且精度不高；随着科学技术的不断发展，电子全站仪、电子经纬仪、GPS等精密仪器在森林调查中有了显著的作用，但存在技术操作、适用范围等缺点，缺乏普适性。目前，国内外都没有找到一种快捷、简便、可靠的测量方法（张琳原等，2014），相关科研人员和林业科技工作者一直在探索采用先进技术进行森林资源调查的方法，以适应当前“智慧林业”建设对森林资源调查工作的更高要求。

随着信息技术在智能终端软硬件系统方面的快速发展，利用智能手机获取立木的树高、胸径和冠幅等测树因子成为可能，这也将为测树装备发展带来一系列变革。同时，随着公众对林业、生态环境关注度的提高，也可以通过非专业装备获取以前依赖专业装备才能获取的相关信息。

## 1.1 森林资源调查

森林资源调查包括一类调查、二类调查和三类调查，一类调查是指全国的森林资源连续调查；二类调查是指森林资源规划设计调查；三类调查是指森林资源作业设计调查（史洁青等，2017；赵芳等，2014），三者相互贯穿衔接形成森林资源调查体系。森林资源调查是合理组织森林经营，实现森林多功能永续利用，建立和健全各级森林资源管理及森林计划体制的基本技术手段。我国每年都需要花费大量的人力、物力和财力进行森林资源的调查工作。

## 1.2 立木因子测量

在森林资源调查中，测定样地内立木的树高、胸径、蓄积量等测树因子是其重要的内容（赵芳等，2014）。立木胸径定义为立木主干距离地面固定高度处的直

径, 现今包括我国在内的大多数国家对于立木胸径的定义为立木所在环境地面以上 1.3m 高度处的立木主干直径为立木胸径。在森林资源调查工作中, 立木胸径的传统测量方法为人工测量, 依靠胸径尺或皮尺等测量工具进行人工实地测量并记录。由于野外工作环境复杂, 工作量较大, 且人力成本高, 传统测量方法效率较低(叶添雄, 2016)。目前在林业资源调查工作中, 仍未找到一种高效且高精度的立木测量解决方法。国内外的相关科研人员 and 林业科技工作者仍在探索一种高效便捷的方法来提高森林资源调查的效率, 以适应当前“数字林业”和“精准林业”对森林资源调查工作的更高要求(闫飞, 2014)。

随着现代科技的进步, 基于 Android 系统的智能手机得到了快速的发展。当前, 智能手机与个人的生活和工作关系密切, 采用智能手机获取立木的树高、胸径和冠幅等测树因子成为可能, 也是测树装备方面的一场变革。另外, 随着公众对林业、生态环境关注度的增强, 也希望借助智能手机等非专业装备获取立木的相关信息。

如果利用普通智能手机摄像头拍摄单张(或多张)图片就能实时获取立木的树高、胸径和冠幅等测树因子, 且精度能满足森林资源调查的要求, 将有利于推进森林资源调查工作的现代化, 有利于实现森林资源调查工作的数字化、精准化、信息化、智能化和内外业工作的一体化。

### 1.3 摄像测量学

摄像测量学(videogrammetry)是近十几年迅速发展起来的新兴交叉学科。它主要由传统的摄影测量学(photogrammetry)、光学测量(optical measurement)、计算机视觉(computer vision)和数字图像处理与分析(digital image processing and analysis)等学科交叉、融合, 取各学科的优势和长处而形成的(Elhakim, 1994; Forsyth et al., 2004; Hartley et al., 2000; McGlone, 2004; Rudin, 1995; 尚洋等, 2005)。它的处理对象以数字(视频)序列图像为主。

摄像测量学是研究利用摄像机、照相机等对动态、静态的景物或物体进行拍摄得到的数字图像, 再应用数字图像处理与分析等技术, 结合各种目标三维信息的求解和分析算法, 对目标结构参数或运动参数进行测量和估计的理论与技术。

摄像测量学的内涵主要包括两个方面: 一方面, 物体的空间三维特性与成像系统间的成像投影关系, 即二维图像与对应三维空间物体之间的关系, 这主要是测量学方面的知识; 另一方面, 从单幅和多幅图像中高精度自动提取、匹配图像目标, 这主要是计算机视觉、图像分析方面的知识。随着摄影测量的三角测量理论和计算机视觉的多视角几何理论的日趋发展成熟, 目前对摄像测量的研究越来越多地涉及第二个方面, 即图像目标的自动、高精度识别定位与匹配。它与常规

图像处理的不同之处在于其更注重目标提取的定位精度。

将三维空间中的景物成像到二维图像上是一个退化过程, 摄像测量学研究如何通过分析二维图像来重建目标的三维信息。为了进行二维、三维定量测量, 摄像测量必须将图像与成像系统及其参数紧密联系起来, 而普通的图像处理一般与成像系统参数无关。因此, 摄像系统的高精度标定是摄像测量的重要特点。传统摄影测量涉及的大多是专业的摄影测量型相机, 通常具有专门的标定设备和方法。而摄像测量大多采用的是普通摄像机、照相机, 经过多种不同的标定方法, 可以使非测量型摄像机、照相机达到测量的要求, 用于高精度测量。

摄像测量涵盖了摄影测量、光学测量和计算机视觉 3 个学科领域, 其应用范围覆盖这 3 个学科的应用领域。摄像测量具有诸多优点, 并已广泛应用于各种精密测量和运动测量, 涉及航空航天、国防军工、勘察勘测、交通运输、建筑施工、体育运动等各个领域 (于起峰等, 2002; 张祖勋, 2007), 如遥感影像测量、飞行器弹道姿态测量、铁路公路质量检测、建筑工程测量等参数测量。

## 1.4 关键技术及技术路线

本书主要分析了现有的几种基于智能手机端的立木因子测量方法及与之相关的关键技术, 并介绍了具体的技术路线。

### 1.4.1 基于智能手机的相机标定方法

根据手机相机 (以下简称相机) 镜头组焦距不变且镜头存在不同程度畸变的特点, 以针孔成像模型 (以下简称针孔模型) 为基础, 参考张正友平面标定法 (Zhang, 1998), 建立一种适用于智能手机的相机标定方法。相机标定方法的技术路线如图 1.1 所示。该方法主要包含以下 3 个步骤。

(1) 以线性针孔成像模型作为相机标定时进行线性约束的参考模型。

(2) 基于智能手机及其相机传感器特点, 引入二阶径向畸变和切向畸变, 建立带有非线性畸变项的相机成像模型。

(3) 相机标定, 自动提取标定模板中的角点信息, 并由线性的单应性关系求解内外参数的初始估值参数。利用 Levenberg-Marquardt (L-M) 算法计算相机各参数及畸变参数。

### 1.4.2 基于 Graph Cut 算法的多株立木轮廓提取方法

基于 Graph Cut 算法的立木轮廓提取方法是基于计算机视觉, 实现单张相片中的多株立木轮廓提取。该方法的技术路线如图 1.2 所示。该方法所介绍的单幅图像中的多株立木轮廓提取方法包含以下 4 个步骤。

(1) 室外移动终端采集立木图像后, 先用彩色直方图均衡化方法对立木图像

进行颜色增强，以便更好地进行图像分割。

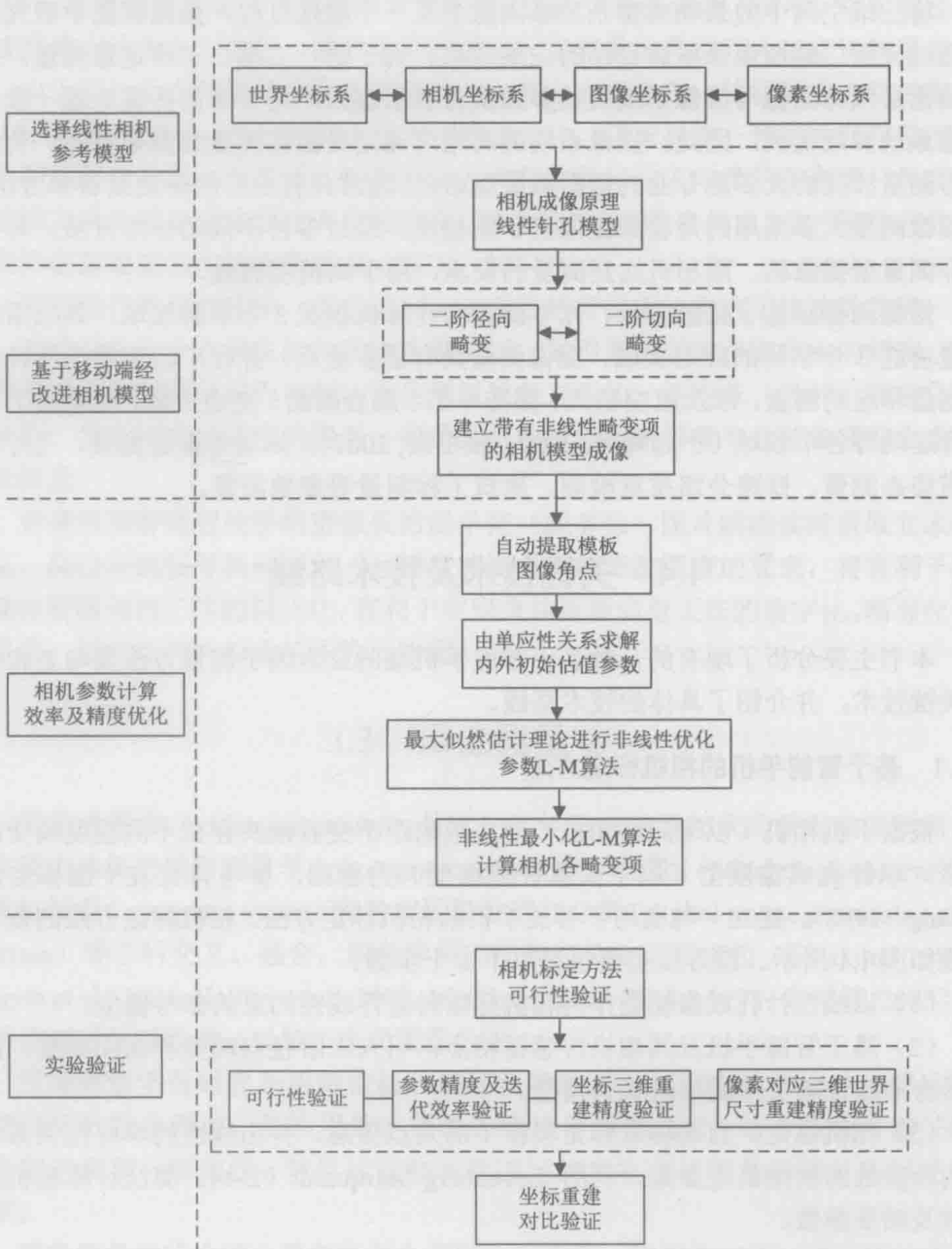


图 1.1 相机标定方法的技术路线

(2) 立木图像分割。利用 Graph Cut 算法构造前景背景图 (s-t 网络图)，寻找能量最小割 (min-cut)，实现单株立木图像前景分割，依次执行 Graph Cut 算法得到最终的多张立木分割结果。

(3) 立木轮廓提取。分别对立木分割结果进行灰度变换得到二值化图像，腐

蚀膨胀操作进行立木内部空洞填充，最后用一种改进的 Canny 算子检测，得到多张立木轮廓图。

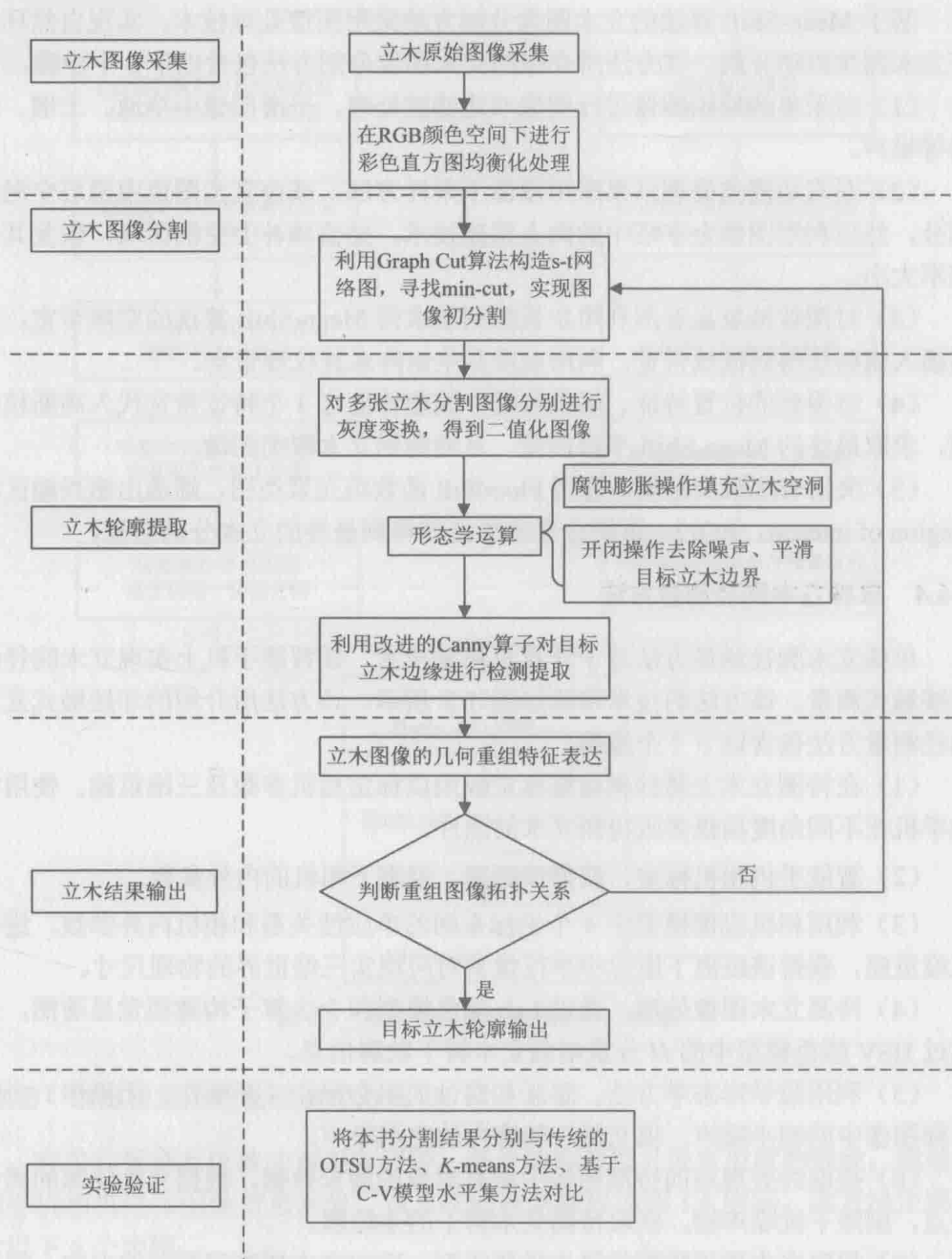


图 1.2 基于 Graph Cut 算法的多株立木轮廓提取方法的技术路线

(4) 立木轮廓特征重组。将多张立木轮廓图像按照位置特征不变性进行重组，得到一张立木轮廓图。

### 1.4.3 基于 Mean-Shift 算法的立木图像分割方法

基于 Mean-Shift 算法的立木图像分割方法采用图像处理技术, 实现自然环境下立木图像自动分割。该方法所介绍的立木图像分割方法包含以下 5 个步骤。

(1) 对采集的原始图像进行图像双边滤波处理, 平滑图像中草地、土壤、道路等噪声。

(2) 对双边滤波处理结果采用图像下采样方法, 减少立木图像中冠层空洞的部分, 然后利用图像金字塔中的向上重建技术, 插值填补上空洞区域, 恢复其分辨率大小。

(3) 对图像抽象显著图利用步长探测法求得 Mean-Shift 算法的空域带宽, 利用插入规则法得到值域带宽, 利用灰度共生矩阵求算纹理带宽。

(4) 将得到的位置特征、颜色特征、纹理特征这 3 个特征带宽代入高斯核函数, 求取最终的 Mean-Shift 平移向量, 从而得到立木聚类图像。

(5) 突出表达聚类结果, 选用 FloodFill 函数填充聚类图, 筛选出感兴趣区域 (region of interest, ROI), 再结合形态学处理得到最终的立木分割结果。

### 1.4.4 单株立木胸径测量方法

单株立木胸径测量方法基于计算机视觉技术, 在智能手机上实现立木胸径的非接触式测量。该方法的技术路线如图 1.3 所示。该方法所介绍的非接触式立木胸径测量方法包含以下 7 个步骤。

(1) 在待测立木上悬挂棋盘格标定板用以标定相机参数及三维重建。使用智能手机在不同角度拍摄多张待测立木的图片。

(2) 智能手机相机标定, 获得该距离、姿态下相机的内外参数。

(3) 利用相机成像模型中 4 个坐标系间的单应性关系和相机内外参数, 进行三维重建, 获得该距离下图片中单位像素对应现实三维世界的物理尺寸。

(4) 待测立木图像处理, 通过 Lab 颜色模型和  $3 \times 3$  算子构建视觉显著图, 并通过 HSV 颜色模型中的  $H$  分量增强立木树干轮廓信息。

(5) 利用数学形态学方法, 膨胀和腐蚀的组合操作 (开操作、闭操作) 去除目标图像中的细小噪声, 填充树干轮廓内的空洞噪声。

(6) 提取经处理后的待测图像中所有对象的周长数据, 根据立木轮廓的周长特点, 剔除干扰噪声物, 获取待测立木树干的主轮廓。

(7) 提取立木树干轮廓的最小外接矩形, 确定立木树高和胸径的方向。根据步骤 (3) 中获得的单位像素的物理尺寸, 计算 1.3m 高度所占像素个数, 获取 1.3m 高度胸径方向的所占像素值, 然后与单位像素对应三维世界的物理尺寸相乘, 计算得到胸径值。

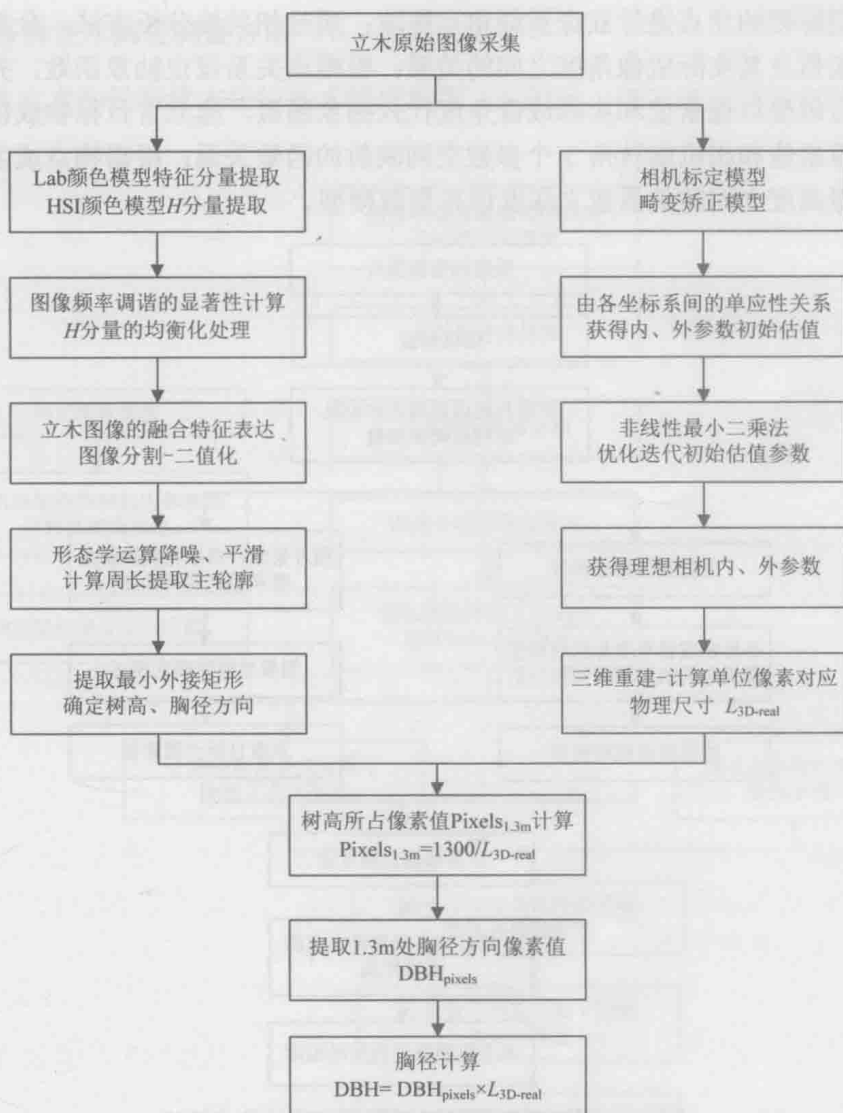


图 1.3 立木胸径测量方法的技术路线

#### 1.4.5 单目视觉系统被动测距方法

在单目视觉系统被动测距方法中，基于地面平整且没有坡度的假设，通过智能手机相机进行图像信息采集。该方法的技术路线如图 1.4 所示。该方法主要包含以下 5 个步骤。

(1) 相机标定。通过智能手机在不同角度下拍摄的多张棋盘格标定板图像，对手机相机进行标定，获取相机内部参数、相机非线性畸变参数和图像分辨率。

(2) 建立深度信息提取模型。设计一种宽度不变、长度递增的新型标靶作为实验材料；采用一种优化的基于模板和梯度值的角点提取方法，对平铺在水平地