

PCL (Point Cloud Learning) 中国创始人团队及国内外多位科研专家联合编著

随着消费级点云设备崛起，以及人们生活对智能化的需求，点云数据的获取、处理和应用变为智能化时代的常用技术。点云库是在吸收点云研究基础上建立的跨平台开源库，也是应用这门技术的必备工具。本书涉及典型点云获取设备、主流平台及一线项目案例等内容。



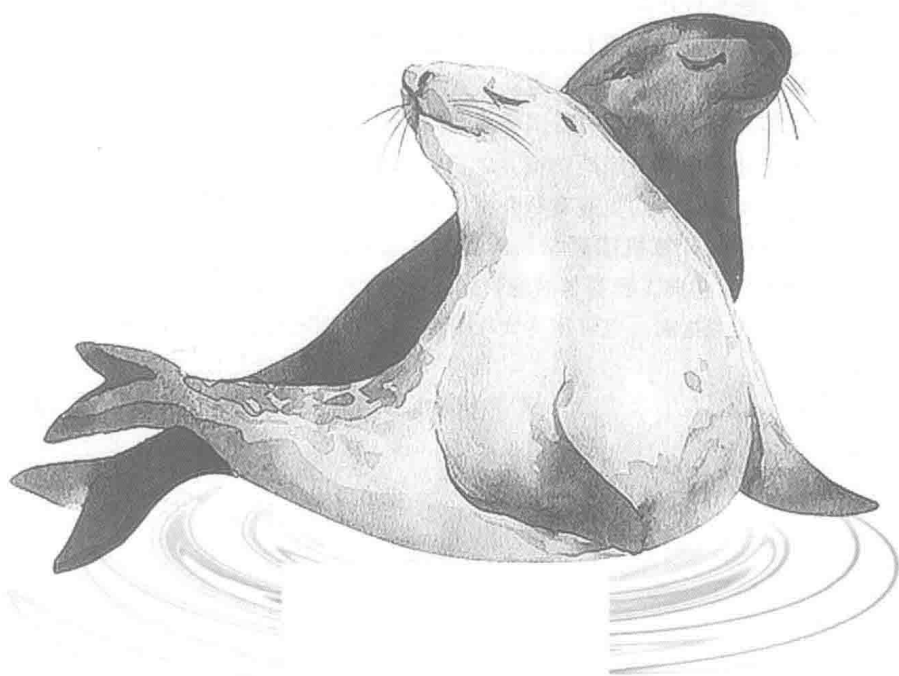
点云库PCL

从入门到精通

郭浩 主编
苏伟 朱德海 王可 副主编



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



点云库PCL

从入门到精通

郭浩 主编
苏伟 朱德海 王可 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

点云库 (Point Cloud Library, PCL) 是在吸收了点云相关研究基础上建立起来的跨平台开源库, 可在 Windows、Linux、Android、Mac OS X, 以及大部分嵌入式实时系统上运行, 目前已经得到了广泛应用。本书为应用点云库技术的指导图书, 旨在帮助读者对其以快速、有效的方式上手操作并实际应用, 最大限度地节省读者的入门与技术提升时间。书中首先介绍了三维点云处理的相关理论知识, 之后则重点从实际的点云处理功能模块出发, 通过大量具体的实践案例介绍如何使用该项技术解决实际问题。

本书可作为计算机图形学、机器人、遥感测量、虚拟现实、人机交互、CAD/CAM 逆向工程等领域的科研人员进行产品开发、科研项目、课题项目时的参考指南, 也可作为大中专院校及培训班相关专业师生的学习手册。

图书在版编目 (CIP) 数据

点云库 PCL 从入门到精通 / 郭浩主编. —北京: 机械工业出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-111-61552-1

I. ①点… II. ①郭… III. ①软件工具 IV. ①TP311. 561

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 284909 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 丁 伦 责任编辑: 丁 伦

责任校对: 丁 伦

责任印制: 张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

185mm × 260mm · 27 印张 · 661 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111- 61552-1

定价: 99.90 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书编者团队

主 编：郭 浩

副主编：苏 伟 朱德海 王 可

参 编（排名不分先后）：

蒋海波	中国科学院成都生物研究所	副研究员（博士）
马 钦	中国农业大学	副教授（博士）
陈 洪	中国农业大学	副教授（博士）
温维亮	北京农业信息技术研究中心	博士
王 庆	中国农业大学	副教授（博士）
郭裕兰	国防科学技术大学电子科学与工程学院	讲师（博士）
王 果	河南工程学院	讲师（博士）
田玉珍	中国科学院长春光学精密机械与物理研究所	助理研究员（博士）
郑顺义	武汉大学遥感信息工程学院	教授
黄 霞	武汉大学遥感信息工程学院	博士
欧 攀	北京航空航天大学	副教授（博士）
林祥国	中国测绘科学研究院	副研究员（博士）
梁吉祥	北京 3D 打印研究院	工业设计工程师
郑碧敏	德国 PointCab GmbH	博士
龙成江	Kitware	资深研究员
邵建超	北京大恒图像视觉有限公司	视觉工程师
张 强	中国科学院自动化研究所（洛阳）机器人与智能装备创新研究院	视觉工程师
郭彦明	北京数字绿土科技有限公司	工程师
李胜威	武汉中观自动化科技有限公司	工程师
李 飞	武汉中观自动化科技有限公司	工程师
张 永	武汉中观自动化科技有限公司	工程师

前言

为什么要写这本书

点云处理技术广泛应用在逆向工程、CAD/CAM、机器人学、激光遥感测量、机器视觉、虚拟现实、人机交互、无人驾驶等诸多领域。由于其涉及计算机学、图形学、人工智能、模式识别、几何计算、传感器等诸多学科，并且一直以来由于点云获取手段的昂贵，严重阻碍其在各个行业上的广泛应用，也造成国内点云处理的理论性和工具性书籍匮乏。在2010年，随着消费级RGBD（低成本点云获取）设备的大量上市，以微软的Kinect为前导，目前已有华硕、三星等多家公司开始量产此类产品，正在形成基于RGBD的新一代机器视觉生态链，包括Google的Project Tango和Intel的Realsense 3D相关技术产品，PCL（Point Cloud Library）应运而生并且发展迅速。PCL是在吸收了点云相关研究基础上建立起来的跨平台开源库，可在Windows、Linux、Android、Mac OS X、部分嵌入式实时系统上运行，它实现了大量通用算法和数据结构，涉及点云获取、滤波、分割、配准、检索、特征提取、识别、追踪、曲面重建、可视化等基础模块以及人体骨骼识别提取、动作跟踪识别等应用，并且新的其他应用正在大量增加。如果说OpenCV是2D信息获取与处理的结晶，那么PCL就在3D信息获取与处理上具有同等地位。笔者深信随着各大厂商对RGBD设备的大力推出，基于此设备的各种应用将会大量涌现，而PCL不仅是这类应用的核心关键技术，还会基于它进行扩展，从而极大地提高应用系统开发效率和稳定性。

三维信息的获取与处理是笔者所在研究团队的重要方向之一，在农业对象的三维信息获取与重建、精细农业等领域不断探索新的获取技术和处理方法，同时也解决一些其他行业的三维应用问题。在2011年7月发现了OpenCV的姐妹PCL及其网站的RSS更新，时刻关注PCL在3D信息获取和处理方面的新动向，并与PCL结缘。在跟踪过程中发现，PCL对RGBD数据的获取和处理提供了强大支持，并有大量的机器人、虚拟现实、人机交互、机器视觉等领域的应用案例，目前几乎每半个月就有新的开发计划，或者有新的资助者或开发者加入。加入PCL开发的团队来自包括全球的AIST, UC Berkeley, University of Bonn, University of British Columbia, ETH Zurich, University of Freiburg, Intel Research Seattle, LAAS/CNRS, MIT, University of Osnabrück, Stanford University, University of Tokyo, TUM, Vienna University

of Technolog, and Washington University in St. Louis 等知名高校和组织。资助 PCL 的组织和公司包括全球的 Willow Garage, NVidia, Google, Toyota, Trimble, Urban Robotics, Honda Research Institute 等跨国软硬件公司, 这一切表明 PCL 强大的生命力和吸引力。同时我们团队已经把 PCL 作为开发出实际应用的基础平台和教学技术平台, 用于跨平台支持嵌入式设备的 3D 信息获取与处理的基础库之一。目前 PCL 还在快速成长阶段, 国内由本书团队早期整理的相关资料已经无法适应当前需要, 鉴于此, 经过团队讨论, 把我们学习、授课课件以及开发应用期间整理的资料与国内读者一起分享, 加快 PCL 在其他各行业的应用, 推动 3D 信息快速获取与处理的发展。

本书目标

每一个最新版本的 PCL 都会被下载超过百万次, 这个数字还不包括下载源码开展自行编译的用户。PCL 在全球范围内的使用者在迅速膨胀, 并且每天都有更多的用户开始学习或者转型使用 PCL。在国内, 早期对 PCL 进行应用开发的团队还不多, 而随着国外众多知名组织和公司的加入和赞助, 和 OpenCV 最初的发展一样, 相信国内的用户数量也会增长很快。

为此, 本书希望能提供一个从入门到精通的学习过程, 无论是初学 3D 点云处理的爱好者, 还是行业从业人员, 希望都能从本书获益, 最大限度地节省您的入门与技术提升时间, 作为主编, 我相信我们团队出书的付出与努力, 所节省的国内所有学习者的时间总和就是我们的社会贡献, 最终快速提升你的技术能力。

注意: 由于本书目标是学习手册, 注重“理工”中的“工”, 所以对理论部分的“理”进行了精简, 力求帮助广大读者所学即可所用。

读者对象

这里我们根据软件需求划分出一些需要使用 PCL 的用户类型, 这些用户都是本书真正的读者群。

- 机器人研究或应用开发者
- 机器视觉的研究或应用开发者
- 人机交互研究或应用开发者
- 交互式体感游戏开发者
- 虚拟现实研究或应用开发者
- CAD/CAM、逆向工程和 3D 打印工作者
- 工业自动化测量、检测领域的研究或应用开发者
- 激光雷达遥感的研究或应用开发者

- 相关专业的研究生和本科生
- 三维数据处理技术教学团队
- 3D 技术的发烧友

如何阅读本书

本书分为如下三大部分。

第一部分为基础篇从第 1 章到第 3 章，简单介绍 PCL 的相关背景资料和基本使用方式，帮助读者了解一些基础背景知识，感受自己的研究应用领域在 PCL 基础上有哪些应用前景，学习如何快速搭建项目开发环境（Windows、Linux、ROS 等平台）并熟悉 PCL 的使用方法以及编程规范，**为读者使用 PCL 做好前期准备工作。**

第二部分为模块篇从第 4 章到第 13 章，着重讲解 PCL 各个模块中涉及的 3D 点云处理的必要概念、模块 API、入门级实例和精通级实例。每章结构都是，先简单介绍本章涉及的相关概念，再重点介绍一些模块相关的类和函数，最后分析入门级的模块应用实例和精通级的实例，让读者不需要太多点云处理基础，也能**轻松掌握 PCL 各个功能模块**。第二部分涵盖点云获取、滤波、分割、配准、检索、特征提取、识别、追踪、曲面重建、可视化等全部已基本定型的模块。

第三部分是结合点云数据处理技术在不同行业的应用，与相关科研单位或公司合作撰写的行业应用实例，**为读者在学好技术后，拓展下行业应用思路和动手能力，从而熟悉各个行业的相关典型应用。**

PCL 版本

PCL 的发布更新以 1.5X 的小版本号来表示，**本书是基于 PCL1.80 版本**。PCL 正在不断开发和完善中，但基本架构和设计思路基本确定，相信读者对本书介绍内容了解之后，对其他版本就轻车熟路了。请参照网站地址——<http://docs.pointclouds.org/trunk/modules.html>。虽然本书中参考所用的 API 文档，仍然在不断更新类、函数，但模块基本确定，不会对 PCL 的理解产生困难。

源代码

本书的源代码、工程文件及相关实例的整理来自于 PCL 官方网站，但笔者针对 PCL 官方网站所提供的例子不足之处，进行了大量的修改和拓展，都以 BSD（Berkeley Software Distribution）许可协议或者 CCA（Creative Commons Attribution）3.0 的形式发布，读者可以自由使用和分享，如果需要应用于商业领域，请注明版权所有。如果你行使本许可授予的

使用源代码的权利，就表明你接受并同意遵守本许可的条款，对其使用不得超越本许可授权的范围。我的理解是：PCL 相关的内容，是可以免费进行商业和学术使用的，最重要的是需要致谢作者和相关贡献者。

勘误和支持

由于作者的水平有限，编写的时间也很仓促，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。如果您有更多的宝贵意见，也欢迎发送邮件至我们团队的邮箱 guohaolys@cau.edu.cn，很期待能够听到读者的真挚反馈，同时也可以在本书的赞助商 PCLCN (www.pclcn.org) 的论坛上发布相关问题和意见。

关于电子版

书中有很多程序运行结果演示图，为了便于大家既能以便宜的价格买到本书，又能看到书中的原始图片，我们将于 PCLCN (Point Cloud Learning in China) 的官方网站 (www.pclcn.org) 推出本书的部分电子配图，敬请期待。

致谢

我首先要感谢 PCL 创始人 Radu 的允许和鼓励，才有本书的面世，同时要感谢 Radu 以及 PCL 的众多开发人员，是他们的创新精神和辛勤努力才有这样一个优异的 3D 信息获取和处理的基础平台供大家分享。

感谢笔者团队参与整理工作的伙伴：华明睿、苏杨、陈子睿、牛全弟、戴开璇、唐诗叶、田孟潇、马羽昊、湛罗超。同时感谢国家自然科学基金项目《基于非刚性点云数据的家畜（奶牛）体尺测量关键技术研究》(41601491) 对笔者团队的支持。

感谢本书的编者们以及来自 PCLCN (Point Cloud Learning in China) 社区 (www.pclcn.org) 的科研和业界学者的协同努力和辛苦劳动，以及此处未明确提及但对本书出版做出贡献的朋友。

最后感谢我的家人，特别是我的母亲和妻子，在我撰书期间对我刚出生女儿的照顾。

郭 浩

目 录

前 言

第1章 概述	1
1.1 PCL是什么	1
1.2 点云处理技术与PCL的前世今生	1
1.3 点云处理技术能给工程师们带来什么	2
1.3.1 测绘领域	2
1.3.2 无人驾驶领域	2
1.3.3 机器人领域	3
1.3.4 人机交互领域	3
1.3.5 逆向工程与其他工业自动化领域	3
1.3.6 BIM领域	4
1.4 PCL的结构与核心内容	5
第2章 PCL入门	7
2.1 快速安装与源码编译安装	7
2.1.1 Windows下配置安装PCL开发环境	7
2.1.2 ROS下配置搭建PCL开发环境	14
2.1.3 用第三方预编译包从源码搭建开发环境	19
2.1.4 从源码搭建开发环境	19
2.2 开发工程的建立与项目管理	19
2.2.1 Windows下建立编译链接PCL工程	19
2.2.2 ROS下建立编译链接PCL工程	19
2.3 PCL编码风格简介	27
2.3.1 PCL编程规范	27
2.3.2 如何编写新的PCL类	32

2.3.3 PCL的点类型以及如何增加自定义的点类型	42
2.3.4 PCL中的异常处理机制	55
第3章 输入输出 (IO)	58
3.1 IO涉及的设备及相关概念	58
3.1.1 OpenNI及类Kinect设备	58
3.1.2 以Project Tango为代表的便携式消费级点云获取设备	60
3.1.3 PCL目前支持的点云获取设备	60
3.1.4 PCL中IO模块及类	61
3.2 IO入门级实例解析	61
3.2.1 PCD文件格式	61
3.2.2 PCD文件IO操作	64
3.2.3 两个点云中的字段或数据连接	67
3.2.4 基于OpenNI接口的点云数据获取	70
3.2.5 PLY、LAS等常见数据格式与PCD的转换	74
3.2.6 利用Kinect2获取点云数据	78
3.3 IO精通级实例解析	81
3.3.1 ROS下进行点云数据实时获取与可视化	81
3.3.2 自选设备scanCONTROL与PCL实时获取与可视化点云数据	85
3.3.3 利用Tango进行点云数据获取	88
3.3.4 基于Structure from Motion的点云	

数据获取	93	6.2.2 使用 VoxelGrid 滤波器对点云进行 下采样	154
第4章 k-d tree 与八叉树	100	6.2.3 使用 StatisticalOutlierRemoval 滤波 器移除离群点	155
4.1 k-d tree 和八叉树的概念及 相关算法	100	6.2.4 使用参数化模型投影点云	157
4.1.1 k-d tree 概念及相关算法	100	6.2.5 从一个点云中提取一个子集	159
4.1.2 PCL 中 k-d tree 模块及类	101	6.2.6 使用 ConditionalRemoval 或 Radius- OutlierRemoval 移除离群点	161
4.1.3 八叉树概念及相关算法	101	6.2.7 CropHull 任意多边形内部点云 提取	164
4.1.4 PCL 中八叉树模块及类	102	6.3 点云滤波精通级实例解析: iPhone X 手机外壳全尺寸检测	166
4.2 k-d tree 与八叉树入门级实例解析	102	6.3.1 项目需求概述	166
4.2.1 在 PCL 中如何实现快速邻域 搜索	102	6.3.2 利用滤波可以实现的功能	166
4.2.2 在 PCL 中如何实现点云压缩	104	第7章 深度图像	173
4.2.3 基于八叉树的空间划分及搜索 操作	108	7.1 RangeImage 概念及相关算法	173
4.2.4 无序点云数据集的空间变化 检测	111	7.1.1 深度图像简介	173
第5章 可视化	114	7.1.2 PCL 中 RangeImage 的相关类	174
5.1 PCL 中 visualization 模块及类	114	7.2 深度图像入门级实例解析	175
5.2 可视化入门级实例解析	114	7.2.1 如何从一个点云创建一个深度 图像	175
5.2.1 简单点云可视化	114	7.2.2 如何从深度图像中提取边界	177
5.2.2 可视化深度图像	117	7.3 深度图像精通级实例解析点云到 深度图的变换与曲面重建	179
5.2.3 PCLVisualizer 可视化类	120	第8章 关键点	182
5.2.4 PCLPlotter 可视化特征直方图	129	8.1 关键点概念及相关算法	182
5.3 可视化精通级实例解析	133	8.2 关键点入门级实例解析	183
5.3.1 PCL 结合 Qt 使用框架	133	8.2.1 如何从距离图像中提取 NARF 关键点	183
5.3.2 PCL 结合 MFC 使用框架	139	8.2.2 SIFT 关键点提取	185
5.3.3 客户端浏览器上对点云进行 可视化	147	8.2.3 Harris 关键点提取	187
第6章 点云滤波	151	8.3 关键点精通级实例解析: 基于对应点 分类的对象识别	188
6.1 PCL 中实现的滤波算法及相关概念	151	第9章 采样一致性	194
6.1.1 PCL 中的点云滤波方案	151	9.1 随机采样一致性相关概念及算法	194
6.1.2 双边滤波算法	152	9.2 采样一致性入门级实例解析	197
6.1.3 PCL 中 filters 模块及类	152		
6.2 点云滤波入门级实例解析	152		
6.2.1 使用直通滤波器对点云进行滤波 处理	152		

9.3 采样一致性精通级实例解析：两两点云获取设备自动标定	201	11.1.1 一对点云配准	250
9.3.1 项目需求概述	201	11.1.2 对应估计	251
9.3.2 具体实现	201	11.1.3 对应关系去除	252
第10章 3D点云特征描述与提取	204	11.1.4 变换矩阵估算	252
10.1 特征描述与提取的概念及相关算法	204	11.1.5 迭代最近点算法	252
10.1.1 3D形状内容描述子	204	11.1.6 采样一致性初始对齐算法	253
10.1.2 旋转图像	205	11.1.7 PCL中Registration模块及类	253
10.1.3 PCL中特征描述与提取模块及类	205	11.2 点云配准入门级实例解析	253
10.2 点云特征描述与提取入门级实例解析	205	11.2.1 如何使用迭代最近点ICP算法	253
10.2.1 PCL中描述三维特征相关基础	205	11.2.2 如何逐步匹配多幅点云	256
10.2.2 估计一个点云的表面法线	208	11.2.3 如何使用正态分布变换进行配准	263
10.2.3 使用积分图进行法线估计	212	11.2.4 交互式迭代最近点配准	268
10.2.4 点特征直方图描述子	213	11.2.5 刚性物体的位姿估计	273
10.2.5 快速点特征直方图描述子	216	11.3 点云配准精通级实例解析	276
10.2.6 估计一点云的VFH特征	219	11.3.1 如何将扫描数据与模板对象进行配准	276
10.2.7 如何从一个深度图像中提取NARF特征	221	11.3.2 基于VFH描述子聚类识别与位姿估计	284
10.2.8 特征描述算子算法基准化分析	224	11.3.3 动态库封装DIY接口与测试	291
10.2.9 RoPs特征	228	11.3.4 交互式多深度摄像头标定软件	294
10.2.10 基于惯性矩与偏心率的描述子	234	第12章 点云分割	300
10.2.11 BoundaryEstimation进行边界提取	235	12.1 点云分割概念及相关算法	300
10.3 点云特征描述与提取精通级实例解析	238	12.1.1 聚类分割算法	300
10.3.1 3D对象识别的假设验证	238	12.1.2 基于随机采样一致性的分割	300
10.3.2 隐式形状模型方法	241	12.1.3 PCL中Segmentation模块及类	301
10.3.3 点云数据视频流的刚性物体位姿估计与跟踪定位软件	245	12.2 点云分割入门级实例解析	301
第11章 点云配准	250	12.2.1 在PCL中如何实现平面模型分割	301
11.1 PCL中实现的配准算法及相关概念	250	12.2.2 在PCL中如何实现圆柱体模型分割	304
		12.2.3 在PCL中如何实现欧式聚类提取	308
		12.2.4 基于区域生长的分割	311

12.2.5 基于颜色的区域生长分割	313	14.1.2 在电力线巡检领域做的工作	364
12.2.6 最小图割的分割	316	14.2 电力线巡检应用实例解析	366
12.2.7 基于法线微分的分割	319	14.2.1 电力线点云获取	366
12.2.8 基于超体素的点云分割	324	14.2.2 结果展示	368
12.2.9 渐进式形态学滤波地面分割	331	14.2.3 总结	368
12.2.10 条件欧氏聚类点云分割	333	第 15 章 文物古迹保护	369
12.3 点云分割精通级实例解析：运动		15.1 文物古迹保护概述	369
对象分割与配准算法实现	336	15.1.1 文物古迹保护介绍	369
12.3.1 代码	336	15.1.2 在文物古迹保护领域所做	
12.3.2 各个关键功能步骤分析	336	工作	369
12.3.3 运动分割与配准结果	341	15.2 文物古迹保护应用实例解析：博物馆	
第 13 章 点云曲面重建	342	文物三维数字化	370
13.1 surface 模块中实现的算法及相关		15.2.1 应用概述	370
概念	342	15.2.2 具体实施步骤	371
13.1.1 凸包算法	342	15.2.3 博物馆文物三维数字化结果	
13.1.2 Ear Clipping 三角化算法	342	展示	372
13.1.3 贪婪投影三角化算法	343	15.2.4 三维数字化总结	374
13.1.4 移动立方体算法	343	第 16 章 地形测量	375
13.1.5 泊松曲面重建算法	344	16.1 地形测绘概述	375
13.1.6 PCL 中 surface 模块及类	344	16.1.1 地形测量介绍	375
13.2 点云曲面重建入门级实例解析	344	16.1.2 在地形测量领域所做工作	375
13.2.1 基于多项式平滑点云及法线估计		16.2 地形测量应用实例解析：机载激光雷	
的曲面重建	344	达在山区地质灾害调查中的应用	376
13.2.2 在平面模型上构建凸（凹）		16.2.1 应用概述	376
多边形	347	16.2.2 具体实施步骤	376
13.2.3 无序点云的快速三角化	350	16.2.3 激光雷达获取地形数据结果	
13.2.4 基于 B 样条曲线的曲面重建	353	展示	378
13.3 点云曲面重建精通级实例解析：		16.2.4 激光雷达获取地形数据总结	380
平面点云的 B 样条曲线拟合	358	第 17 章 无人驾驶	381
13.3.1 B 样条曲线和 B 样条曲线拟合		17.1 无人驾驶概述	381
概述	358	17.1.1 无人驾驶介绍	381
13.3.2 平面点云 B 样条曲线拟合详细		17.1.2 在无人驾驶领域做的工作	381
步骤	359	17.2 基于点云数据获取与处理技术的无人	
第 14 章 电力线巡检	364	驾驶公司列表	384
14.1 电力线巡检概述	364	第 18 章 逆向工程	385
14.1.1 电力线巡检介绍	364	18.1 逆向工程概述	385

18.1.1 逆向工程介绍	385	分离	394
18.1.2 在逆向工程领域所做工作	385	19.2.3 激光雷达林业资源调查	398
18.2 逆向工程应用实例解析：汽车部件 逆向工程	386	第 20 章 家畜表型测量	403
18.2.1 汽车部件逆向工程概述	386	20.1 家畜表型测量概述	403
18.2.2 汽车部件逆向工程解决方案	387	20.1.1 家畜表型测量介绍	403
18.2.3 汽车部件逆向工程结果展示	388	20.1.2 在家畜表型测量领域所做 工作	403
18.2.4 汽车部件逆向工程总结	388	20.2 基于点云数据的家畜表型测量应用 实例解析	405
第 19 章 植物表型测量	389	20.2.1 家畜多视角体表点云获取	405
19.1 植物表型测量概述	389	20.2.2 基于点云数据的家畜自动化体尺 测点提取及交互式体尺测量	409
19.1.1 植物表型测量介绍	389	附录：国内外点云数据处理商业软件 集合	412
19.1.2 在植物表型测量领域所做 工作	389	参考文献	418
19.2 植物表型测量应用实例解析	391		
19.2.1 玉米果穗点云分割	391		
19.2.2 玉米叶片点云与茎秆点云			

第1章

概 述

引言

PCL 是什么？它是如何发展而来的？对读者有什么用处？目前和将来发展如何？它的内容有哪些，具体架构如何？本章会带着读者完成以上问题的解答，让读者对 PCL 有个总体的蓝图，为后续章节的总体把握和阅读奠定基础。

1.1 PCL 是什么

PCL (Point Cloud Library, 点云库) 是在吸收了前人点云相关研究基础上建立起来的大型跨平台开源 C++ 编程库，它实现了大量点云相关的通用算法和高效数据结构，涉及点云获取、滤波、分割、配准、检索、特征提取、识别、追踪、曲面重建、可视化等；支持多种操作系统平台，可在 Windows、Linux、Android、Mac OS X、部分嵌入式实时系统上运行。如果说 OpenCV 是 2D 信息获取与处理的结晶，那么 PCL 就在 3D 信息获取与处理上具有同等地位。PCL 是 BSD 授权方式，可以免费进行商业和学术应用。

1.2 点云处理技术与 PCL 的前世今生

点云是分布在 N 维空间中的离散点集，主要以三维为主，它是对物体表面信息的离散采样。三维扫描技术的迅速发展使得点云数据的获取更加简单方便，而点云驱动的计算机图形学在逆向工程、数字城市、文物保护、智能机器人、无人驾驶和人机交互等领域日益彰显其广阔的应用前景。点云处理技术包括点云获取、滤波、分割、配准、检索、特征提取、识别、追踪、曲面重建、可视化等方法技术，也包括结合图论、模式识别、机器学习、数据挖掘和深度学习等人工智能算法之后的解决实践应用中的同步定位与地图构建 (SLAM)、三维模型检索、三维场景语义分析、广义点云等综合技术内容。PCL 是点云数据处理领域中开源的一个重要工具。

PCL 起初是 ROS (Robot Operating System) 下由来自于慕尼黑大学年轻的 Radu 博士等人维护和开发的开源项目, 主要应用于机器人研究应用领域, 随着各个算法模块的积累, 于 2011 年独立出来, 正式与全球 3D 信息获取、处理的同行一起, 组建了强大的开发维护团队, 以多所知名大学、研究所和相关硬件、软件公司为主, 如图 1-1 所示。之后, 发展非常迅速, 不断有新的研究机构等加入, 在 Willow Garage、NVIDIA、Google、Toyota、Trimble、Urban Robotics、Honda Research Institute 等多个全球知名公司的资金支持下, 不断提出新的开发计划, 代码更新非常活跃, 截至 2017 年 7 月, 在不到 7 年的时间内从 1.0 版本已经发布到 1.8.0 版本, 并且有社区长期维护, 不过近期更新速度有所减缓。



图 1-1 加入或资助 PCL 开发的组织、研究所、公司

PCL 是集体智慧的结晶, 是大家共同努力的结果。如果没有这些人的贡献, 也就不可能有 PCL 的出现, 笔者在此表示无比敬仰。

随着加入组织的增多, PCL 官方目前的计划是继续加入很多新的功能模块和算法的实现, 包括当前最新的 3D 相关的处理算法和相关设备的支持, 如基于 PrimeSensor 3D 设备、微软 Kinect 或者华硕的 XTionPRO 智能交互应用等, 详细情况读者可以参考官方网站每期的新闻, 而且也计划进一步支持使用 CUDA 和 OpenCL 等基于 GPU 的高性能计算技术。随着消费级点云获取设备 Google 的 Project Tango、Intel 的 RealSense 3D 深度摄像头系列、微软的 Kinect v2 等的不断完善和推广, 笔者相信在近几年内会有更多的人和组织加入到这个项目中来, 共享开源 PCL 带来的各自领域的成果。

1.3 点云处理技术能给工程师们带来什么

1.3.1 测绘领域

能够直接获取高精度三维地面点数据, 是对传统测量技术在高程数据获取及自动化快速处理方面的重要技术补充。激光遥感测量系统在地形测绘、环境检测、三维城市建模、地球科学、行星科学等诸多领域具有广泛的发展前景, 是目前最先进的能实时获取地形表面三维空间信息和影像的遥感系统。目前, 在各种提取地面点的算法中, 算法结果与实际结果之间差别较大, 违背了实际情况, PCL 中强大的模块可以助力此处的各种需求。

1.3.2 无人驾驶领域

无人驾驶车辆 (unmanned vehicle) 是一种具有自动驾驶行为的车辆。它是在传统车辆

基础上,加入环境感知、智能决策、路径规划、行为控制等人工智能模块,进而可以与周围环境交互并作出相应决策和动作的移动轮式机器人,用于解放驾驶员,辅助安全驾驶,得到了广泛的关注,并且拥有良好的前景。无人驾驶能够实现主要是依赖车载 LiDAR 点云系统,其可以快速提取地球表面物体三维坐标信息,实时定位于构建地图,有着其他方法无法比拟的优势:1) 数据采集速度快,只需沿街一次便可收集所有信息;2) 抗干扰能力强,全天候 24 小时都可进行数据采集;3) 点云密度大,数据量丰富,精度可靠;4) 可以得到实时车辆的位姿信息。

1.3.3 机器人领域

移动机器人对其工作环境的有效感知、辨识与认知,是其进行自主行为优化并可靠完成所承担任务的前提和基础。如何实现场景中物体的有效分类与识别是移动机器人场景认知的核心问题,目前基于视觉图像处理技术来进行场景的认知是该领域的重要方法。但移动机器人在线获取的视觉图像质量受光线变化影响较大,特别是在光线较暗的场景更难以应用,随着 RGBD 获取设备的大量推广,在机器人领域势必掀起一股深度信息结合 2D 信息的应用研究热潮,深度信息的引入能够使机器人更好地对环境进行认知、辨识,与图像信息在机器人领域的应用一样,需要强大智能软件算法支撑,PCL 就为此而生,最重要的是 PCL 本身就是为机器人而发起的开源项目,PCL 中不仅提供了对现有的 RGBD 信息的获取设备的支持,还提供了高效的分割、特征提取、识别、追踪等最新的算法,最重要的是它可以移植到 ROS、Android、ubuntu 等主流 Linux 平台上,PCL 无疑将会成为机器人应用领域的一把瑞士军刀。

工业 4.0 的内涵中,特别强调了智能制造、信息物理系统(Cyber-Physical System)等概念,智能意味着机器人要具备有效感知、辨识与认知能力,同时产生相应的决策,3D 彩色点云数据相信是目前最接近人类本身视觉系统的一种模拟数据,所以作为点云数据处理的工具,PCL 必将成为迈向工业 4.0 的关键工具之一。

1.3.4 人机交互领域

虚拟现实技术(简称 VR),又称灵境技术,是以沉浸性、交互性和构想性为基本特征的计算机高级人机界面。它综合利用了计算机图形学、仿真技术、多媒体技术、人工智能技术、计算机网络技术、并行处理技术和多传感器技术,模拟人的视觉、听觉、触觉等感觉器官功能,使人能够沉浸在计算机生成的虚拟境界中,并能够通过语言、手势等自然的方式与之进行实时交互,创建了一种适人化的多维信息空间,具有广阔的应用前景。目前各种交互式体感应用的推出,让虚拟现实与人机交互发展非常迅速,以微软、华硕、三星等为例,目前诸多公司推出的 RGBD 解决方案,势必会让虚拟现实走出实验室,因为现有的 RGBD 设备已经开始大量推向市场,只是缺少其他应用的跟进,这正是在为虚拟现实和人机交互应用铸造生态链的底部,笔者认为这也正是 PCL 为何在此时才把自己与世人分享的重要原因所在,它将是基于 RGBD 设备的虚拟现实和人机交互应用生态链中最重要的一环。让我们抓住这一个节点,立足于交互式应用的一片小天地,但愿本书来的不是太迟。

1.3.5 逆向工程与其他工业自动化领域

大部分工业产品是根据二维或三维 CAD 模型制造而成,但有时因为数据丢失、设计多

次更改、实物引进等原因,产品的几何模型无法获得,因而常常需要根据现有产品实物生成物体几何模型。逆向工程技术能够对产品实物进行测绘,重构产品表面三维几何模型,生成产品制造所需的数字化文档。在一些工业领域,如汽车制造业,许多零件的几何模型都通过逆向工程由油泥模型或实物零件获得,目前在 CAD/CAM 领域利用激光点云进行高精度测量与重建成为趋势,同时引来了新的问题,通过获取的海量点云数据,来提取重建模型的几何参数,或者形状模型,对模型进行智能检索,从点云数据获取模型的曲面模型等,诸如此类的问题解决方案在 PCL 中都有涉及。例如 kdtree 和 octree 对海量点云进行高效压缩存储与管理,其中滤波、配准、特征描述与提前基础处理,可以应用于模型的智能检索,以及后期的曲面重建和可视化都在 PCL 中有相应的模块。总之,三维点云数据的处理是逆向工程中比较重要的一环,PCL 中间所有的模块正是为此而生的。

1.3.6 BIM 领域

BIM (Building Information modeling, 建筑信息模型化),是用三维模型作为信息载体,以描述建筑物生命周期内的建设活动的一种理念。BIM 工作的核心是建立一个可供建筑设计者、结构设计者、施工方、物业方乃至业主等参与者都能使用、修改的三维模型。这样的模型一般称为 BIM 模型,这种模型是现实地物的虚拟映射,大到整个项目的规三维激光扫描技术为 BIM 建立模型提供准确的几何信息,可以大面积、高效率、全面地采集地物的几何信息以及功能特性,快捷地建立起精确的地物模型。通过三维激光扫描得到的点云 BIM 模型能够非常真实地呈现地物的实际状态,作为一种基础数据类型,结合 BIM 工程主要有以下几方面的应用:

1. 文物建筑保护

通过三维扫描技术,可以准确地采集和记录管理古建筑的几何信息和非建筑几何信息(位置及地物关系、构件尺寸、材料等),对文物建筑的墙面、门窗、梁柱等构件等做到数据化、标准化的建档管理,能够详尽地掌握文物的状态(变形、破裂、偏离等),方便日常的维护与修缮工作。

2. 工程质量检测与管理

工程建设前,由三维数据构建施工现场 BIM 模型,为工程的设计提供精确、可靠的实地数据,保证设计的科学、合理性,并且能在进场施工之前就安排好工地布局,最大限度地减小对周围环境的影响,并且为后续的高效施工打下基础。工程建设中,使用 BIM 可以将土建、幕墙、机电、装饰、消防、暖通等分项进度和资源供应计划进行高效链接,指导工程建设过程,提高施工及资源的配置效率。工程建设完毕后,将完成后的三维建筑模型与设计标准模型进行比对,实现对建筑物的精确验收,对整个工程做出客观评判。

3. 建筑拆迁管理

通过三维扫描,能够建立起动态、可视化的建筑模型,并且获得准确的建筑物信息,将完整的建筑物信息导入 BIM 中,可以将建筑物的各种构建进行可重用性分级,根据不同的级别制定详细的建筑垃圾回收方案,对建筑废料进行回收再利用,尽可能减少对环境的污染,提高资源的利用率。

4. 建筑物改造或装修

在建筑物改造和装修过程中,可以利用点云数据建立的 BIM 模型,进行可视化的设计,