

Point cloud  
library PCL

# 点云库PCL

## 学习教程

主编 朱德海

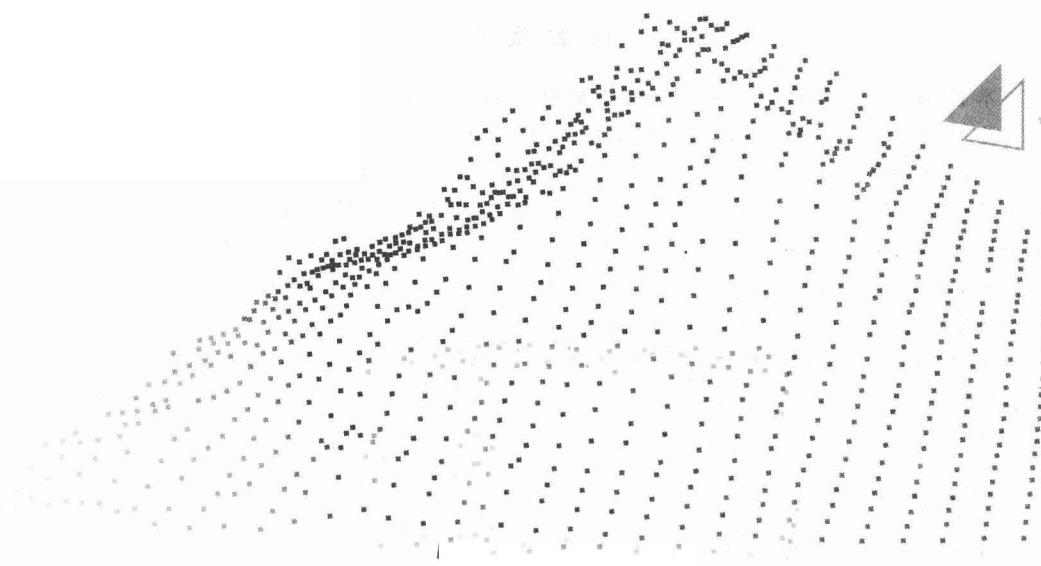
副主编 郭 浩 苏 伟

pointcloudlibrary



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS





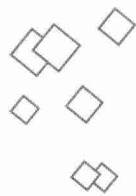
# 点云库PCL

## 学习教程



主编 朱德海

副主编 郭 浩 苏 伟



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书的取材、编写体现了 PCL 强大的功能模块、统一易学的 C++ 调用接口两个特点。全书共分为 16 章,第 1~3 章介绍了 PCL 的概述、入门与基础,第 4~7 章详细介绍 PCL 基础功能模块输入/输出 I/O、kd-tree、八叉树、可视化,该 4 章为后续章节模块的基础,第 8~15 章详细介绍 PCL 高级处理功能模块点云滤波、深度图像、关键点、采样一致性、点云特征描述与提取、点云配准、点云分割、点云曲面重建,第 16 章介绍了一些典型综合应用,让读者感受 PCL 的强大与易用。

本书附光盘 1 张,内容包括 PCL 1.5 分别在 Windows、Linux、Android、Ubuntu、Mac OS X 等系统环境下的安装程序以及书中所有实例的源代码。

本书可作为计算机图形学、3D 点云处理和机器人学、遥感测量、虚拟现实、人机交互、CAD/CAM 逆向工程等领域的高年级本科生、研究生的教学用书,也可作为学生和科研人员课题项目、科研项目以及公司产品开发的参考手册。

### 图书在版编目(CIP)数据

点云库 PCL 学习教程 / 朱德海主编. --北京:北京  
航空航天大学出版社,2012.10  
ISBN 978-7-5124-0954-5

I. ①点… II. ①朱… III. ①激光打印机—命令语言  
—教材 IV. ①TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 218717 号

版权所有,侵权必究。

### 点云库 PCL 学习教程

主 编 朱德海

副主编 郭 浩 苏 伟

责任编辑 刘 晨 刘朝霞

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:710×1 000 1/16 印张:26 字数:570 千字

2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0954-5 定价:59.00 元(含光盘 1 张)

# 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、立体 3D 影像等诸多领域。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,但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 设备(低成本点云获取)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,PCL(Point Cloud Library)应运而生。PCL 是在吸收了前人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,而且基于它进行扩展,将会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、虚拟农业等领域不断探索新的获取技术和处理方法,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

## 前言

Freiburg, Intel Research Seattle, LAAS/CNRS, MIT, University of Osnabrück, Stanford University, University of Tokyo, TUM, Vienna University of Technology, 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,用于跨平台支持嵌入式设备的 3D 农业信息获取与处理的基础库。目前 PCL 正在快速成长阶段,国内外尚无相关的中英文系统学习书籍,鉴于此,经过团队讨论,把我们学习和开发应用期间整理的资料与国内读者一起分享,加快 PCL 在其他各行业中的应用,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做自行编译的用户。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。

在国内知道 PCL 人还不多,就更不用说应用 PCL 了,而国外有如此之多的知名组织和公司的加入和赞助,和 OpenCV 的发展一样,国内的用户数量必将在 2013 年爆发式增长。

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,我希望读者都能从本书获益,节省入门时间,快速提升技术能力。

## 读者对象

这里根据软件需求划分出一些能使用 PCL 的用户类型,这些用户都是本书潜在的读者群。

- 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 和逆向工程工作者。
- 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。
- 3D 技术的发烧友。

## 如何阅读本书

本书分为三大部分,其中第三部分以接近实战的实例来讲解工程应用,相比于前两部分更独立。如果读者是一名经验丰富的资深用户,已经知道 PCL 的相关基础知识和使用方法,那么读者可以直接阅读测试这部分内容。但如果读者是一名初学者,请一定从第 1 章的基础理论知识开始学习。

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,感受自己的研究领域在 PCL 基础上有哪些应用前景,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 15 章,着重讲解 PCL 各个模块中涉及的 3D 点云处理的概念、模块 API、实例应用。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,最后分析几个典型的模块应用实例,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,骨骼识别与跟踪模块还正在开发,本书未包含。

第三部分是综合应用篇第 16 章,通过基于 PCL 的典型应用案例进行介绍,让读者进一步能够体验 PCL 的强大,同时了解一些虚拟现实和人机交互领域的新事物。

光盘收集 PCL1.51 的开发资源及本书中涉及的实例程序和数据。

## PCL 版本

PCL 的发布更新以 1.5X 的小版本号来表示,本书针对的是 1.51 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,仍然在不断更新新的类、函数,但模块基本确定,不会对 PCL 的理解产生困难。



## 前言

### 源代码

本书的所有源代码和工程文件大多数整理来自于 PCL 官方网站,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。如果读者行使本许可授予的使用源代码的权利,就表明读者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,书中难免会出现一些错误或者不准确的地方,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。如果读者有更多的宝贵意见也欢迎发送邮件至我们团队的博士生郭浩的邮箱 guohaolys@cau.edu.cn,我很期待能够听到你们的真挚反馈。

### 关于电子版

本书中有很多程序运行结果演示图,但是很遗憾,由于考虑到成本和定价等因素,本书未能印刷成彩色。为了便于大家既能以很便宜的价格买到这本书,又能看到书中的原始图片,我们将在适当的时候在网络上推出该书的电子版彩色图片,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。

感谢本团队参与人员的协同努力和辛苦劳动,特别是我的博士生郭浩在本书的启动、与 Radu 的沟通、组织和实例验证方面所做的巨大贡献。感谢参与翻译的老师、朋友和同学——林祥国、李公元、晏贺猛、邵建超、陈萍、蒋海波、贺勇、郭志伟、李沁、祁兵、王应彪、刘睿、董润如、刘婷、李志博、刘柯楠等,以及此处未明确提及但对本书出版做出贡献的朋友。

朱德海

中国农业大学信息与电气工程学院  
农业部农业信息获取技术重点实验室

2012 年 8 月

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 概 述 .....                  | 1  |
| 1.1 什么是 PCL .....                | 1  |
| 1.2 PCL 的发展与创景 .....             | 1  |
| 1.3 PCL 的潜在应用领域 .....            | 2  |
| 1.3.1 机器人领域 .....                | 2  |
| 1.3.2 CAD/CAM、逆向工程 .....         | 3  |
| 1.3.3 激光遥感测量 .....               | 3  |
| 1.3.4 虚拟现实、人机交互 .....            | 3  |
| 1.4 PCL 在中国 .....                | 4  |
| 1.5 PCL 的结构和内容 .....             | 4  |
| 第 2 章 PCL 入门 .....               | 7  |
| 2.1 Windows 下配置安装 PCL 开发环境 ..... | 7  |
| 2.1.1 从预编译包搭建开发环境 .....          | 7  |
| 2.1.2 用第三方预编译包从源码搭建开发环境 .....    | 16 |
| 2.1.3 从源码搭建开发环境 .....            | 23 |
| 2.2 Linux 下配置搭建 PCL 开发环境 .....   | 28 |
| 2.2.1 预编译包搭建 .....               | 29 |
| 2.2.2 从源代码安装 .....               | 30 |
| 2.3 其他操作系统 .....                 | 31 |
| 2.4 建立自己的 PCL 应用程序 .....         | 31 |
| 2.4.1 先决条件 .....                 | 31 |
| 2.4.2 工程设置 .....                 | 31 |
| 2.4.3 编译和运行工程 .....              | 33 |
| 第 3 章 PCL 基础 .....               | 36 |
| 3.1 PCL C++ 编程规范 .....           | 36 |
| 3.1.1 PCL 推荐的命名规范 .....          | 36 |
| 3.1.2 PCL 推荐的缩进与格式 .....         | 38 |
| 3.1.3 设计结构 .....                 | 41 |
| 3.2 如何编写新的 PCL 类 .....           | 42 |
| 3.2.1 优势:为什么加入 PCL 开源开发模式 .....  | 42 |
| 3.2.2 建立文件结构 .....               | 43 |



## 目 录

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 3.2.3 | 填写类的内容                 | 45  |
| 3.2.4 | 许可                     | 52  |
| 3.2.5 | 合理命名                   | 53  |
| 3.2.6 | 代码注释                   | 53  |
| 3.2.7 | 测试新建的类                 | 54  |
| 3.3   | PCL已有点类型介绍和增加自定义的点类型   | 54  |
| 3.3.1 | 为什么用 PointT 类型         | 54  |
| 3.3.2 | PCL 中有哪些可用的 PointT 类型  | 55  |
| 3.3.3 | 如何在模板类中使用这些 point 类型   | 67  |
| 3.3.4 | 如何增加新的 PointT 类型       | 69  |
| 3.4   | PCL 中异常处理机制            | 70  |
| 3.4.1 | 开发者如何增加一个新的异常类         | 71  |
| 3.4.2 | 如何使用自定义的异常             | 71  |
| 3.4.3 | 异常的处理                  | 72  |
| 第4章   | 输入/输出(I/O)             | 74  |
| 4.1   | I/O 涉及的设备及相关概念简介       | 74  |
| 4.1.1 | OpenNI 开源框架            | 74  |
| 4.1.2 | OpenNI 兼容设备            | 75  |
| 4.2   | PCL 中 I/O 模块及类介绍       | 76  |
| 4.2.1 | I/O 模块中类以及全局函数说明       | 76  |
| 4.2.2 | I/O 模块其他关键成员说明         | 85  |
| 4.3   | 应用实例解析                 | 87  |
| 4.3.1 | PCD(点云数据)文件格式          | 87  |
| 4.3.2 | 从 PCD 文件中读取点云数据        | 91  |
| 4.3.3 | 向 PCD 文件写入点云数据         | 93  |
| 4.3.4 | 连接两个点云中的字段或数据形成新点云     | 95  |
| 4.3.5 | PCL 中的 OpenNI 点云获取框架   | 98  |
| 第5章   | kd-tree                | 104 |
| 5.1   | kd-tree 概念简介           | 104 |
| 5.2   | PCL 中 kd-tree 模块及类介绍   | 105 |
| 5.2.1 | kd-tree 模块中类说明以及全局函数说明 | 105 |
| 5.2.2 | kd-tree 模块其他关键成员说明     | 107 |
| 5.3   | 应用实例解析                 | 108 |
| 第6章   | 八叉树                    | 112 |
| 6.1   | octree 概述及相关算法简介       | 112 |
| 6.2   | PCL 中 octree 模块及类介绍    | 113 |

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3 应用实例解析 .....                                               | 121 |
| 6.3.1 在 PCL 中如何实现点云压缩 .....                                    | 121 |
| 6.3.2 基于 octree 的空间划分及搜索操作 .....                               | 127 |
| 6.3.3 无序点云数据集的空间变化检测 .....                                     | 130 |
| <b>第 7 章 可视化</b> .....                                         | 133 |
| 7.1 可视化相关概念及算法简介 .....                                         | 133 |
| 7.2 PCL 中 visualization 模块及类介绍 .....                           | 133 |
| 7.2.1 pcl_visualization 模块中类说明 .....                           | 133 |
| 7.2.2 pcl_visualization 模块其他关键成员说明 .....                       | 151 |
| 7.3 应用实例解析 .....                                               | 152 |
| 7.3.1 点云视窗类 CloudViewer .....                                  | 152 |
| 7.3.2 怎样可视化深度图像 .....                                          | 155 |
| 7.3.3 PCLVisualizer 可视化类 .....                                 | 158 |
| <b>第 8 章 滤波</b> .....                                          | 171 |
| 8.1 PCL 中滤波模块相关概念及算法介绍 .....                                   | 171 |
| 8.2 PCL 中 filters 模块及类介绍 .....                                 | 172 |
| 8.2.1 PCL 中 filter 模块相关类的介绍 .....                              | 172 |
| 8.2.2 滤波模块中其他关键函数 .....                                        | 184 |
| 8.3 应用实例解析 .....                                               | 185 |
| 8.3.1 在 PCL 中使用直通滤波器对点云进行滤波处理 .....                            | 185 |
| 8.3.2 使用 VoxelGrid 滤波器对点云进行下采样 .....                           | 187 |
| 8.3.3 使用 StatisticalOutlierRemoval 滤波器移除离群点 .....              | 189 |
| 8.3.4 使用参数化模型投影点云 .....                                        | 191 |
| 8.3.5 从一个点云中提取索引 .....                                         | 194 |
| 8.3.6 使用 ConditionalRemoval 或 RadiusOutlierRemoval 移除离群点 ..... | 196 |
| <b>第 9 章 深度图像</b> .....                                        | 200 |
| 9.1 模块 RangeImage 相关概念及算法简介 .....                              | 200 |
| 9.2 PCL 中模块 RangeImage 相关类的介绍 .....                            | 201 |
| 9.3 应用实例解析 .....                                               | 210 |
| 9.3.1 如何从点云创建深度图像 .....                                        | 210 |
| 9.3.2 如何从深度图像中提取边界 .....                                       | 213 |
| <b>第 10 章 关键点</b> .....                                        | 216 |
| 10.1 关键点概念及相关算法简介 .....                                        | 216 |
| 10.2 PCL 中 keypoints 模块及类介绍 .....                              | 217 |
| 10.3 应用实例解析 .....                                              | 222 |

## 目 录

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第 11 章 采样一致性算法</b> .....                                     | 226 |
| 11.1 随机采样一致性相关概念及算法简介 .....                                     | 226 |
| 11.1.1 RANSAC 随机采样一致性算法简介 .....                                 | 226 |
| 11.1.2 LMedS 最小中值方差估计算法 .....                                   | 227 |
| 11.1.3 PCL 中 Sample_consensus 模块支持的几何模型 .....                   | 228 |
| 11.2 PCL 中 Sample_consensus 模块及类介绍 .....                        | 229 |
| 11.2.1 Sample_consensus 模块中类介绍 .....                            | 229 |
| 11.2.2 pcl_sample_consensus 模块其他关键成员说明 .....                    | 248 |
| 11.3 应用实例解析 .....                                               | 249 |
| <b>第 12 章 点云特征描述与提取</b> .....                                   | 254 |
| 12.1 特征描述与提取相关概念及算法简介 .....                                     | 254 |
| 12.2 PCL 中特征描述与提取模块及类介绍 .....                                   | 255 |
| 12.2.1 pcl_features 模块中类介绍 .....                                | 255 |
| 12.2.2 features 模块其他关键成员说明 .....                                | 270 |
| 12.3 应用实例解析 .....                                               | 271 |
| 12.3.1 PCL 中描述三维特征相关基础 .....                                    | 271 |
| 12.3.2 估计一个点云的表面法线 .....                                        | 276 |
| 12.3.3 使用积分图进行法线估计 .....                                        | 280 |
| 12.3.4 点特征直方图(PFH)描述子 .....                                     | 282 |
| 12.3.5 快速点特征直方图(FPFH)描述子 .....                                  | 285 |
| 12.3.6 估计一点云的 VFH 特征 .....                                      | 288 |
| 12.3.7 如何从一个深度图像(range image)中提取 NARF 特征 .....                  | 292 |
| 12.3.8 特征描述算子算法基准化分析 .....                                      | 294 |
| <b>第 13 章 点云配准</b> .....                                        | 300 |
| 13.1 PCL 中实现的配准算法以及相关概念 .....                                   | 300 |
| 13.2 PCL 中 Registration 模块及类介绍 .....                            | 303 |
| 13.2.1 Registration 模块中类的介绍 .....                               | 303 |
| 13.2.2 配准模块中相关结构体介绍 .....                                       | 319 |
| 13.3 应用实例解析 .....                                               | 320 |
| 13.3.1 如何使用迭代最近点算法 .....                                        | 320 |
| 13.3.2 如何逐步匹配多幅点云 .....                                         | 323 |
| 13.3.3 如何使用正态分布变换(Normal Distributions Transform)进行<br>配准 ..... | 332 |
| <b>第 14 章 点云分割</b> .....                                        | 338 |
| 14.1 点云分割概念及相关算法简介 .....                                        | 338 |
| 14.1.1 聚类分割算法 .....                                             | 338 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 14.1.2 基于随机采样一致性(RANSAC)的分割 .....     | 338        |
| 14.2 PCL 中 Segmentation 模块及类介绍 .....  | 339        |
| 14.2.1 Segmentation 模块中类的介绍 .....     | 339        |
| 14.2.2 Segmentation 模块的其他全局关键函数 ..... | 346        |
| 14.3 应用实例解析.....                      | 348        |
| 14.3.1 在 PCL 中如何实现平面模型分割 .....        | 348        |
| 14.3.2 在 PCL 中如何实现圆柱体模型分割 .....       | 350        |
| 14.3.3 在 PCL 中如何实现欧氏聚类提取 .....        | 355        |
| <b>第 15 章 点云曲面重建 .....</b>            | <b>359</b> |
| 15.1 surface 模块中实现的算法及相关概念简介 .....    | 359        |
| 15.2 PCL 中 surface 模块及类介绍 .....       | 362        |
| 15.2.1 Surface 模块中类介绍 .....           | 362        |
| 15.2.2 surface 模块中其他关键成员说明 .....      | 372        |
| 15.3 应用实例解析.....                      | 372        |
| 15.3.1 基于多项式拟合的法线估计、点云平滑和数据重采样 .....  | 372        |
| 15.3.2 在平面模型上提取凸(凹)多边形.....           | 375        |
| 15.3.3 无序点云的快速三角化.....                | 379        |
| <b>第 16 章 综合应用 .....</b>              | <b>384</b> |
| 16.1 对齐对象模板到点云.....                   | 384        |
| 16.2 基于 VFH 描述子的聚类识别与 6 自由度位姿估计 ..... | 393        |

# 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 有个总体的了解，为后续章节的总体把握和阅读奠定基础。

### 1.1 什么是 PCL

PCL(Point Cloud Library)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 PCL 的发展与创景

PCL 起初是 ROS(Robot Operating System)下由来自斯坦福大学年轻的 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。截止目前，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，如图 1-2 所示，不断提出新的开发计划，代码更新非常活跃，至今(2012 年 4 月)在不到一年的时间内从 1.0 版本已经发布到 1.5.1 版本。

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 PrimeS-

## 第 1 章 概述



图 1-1 加入或资助 PCL 开发的组织、研究所、公司



图 1-2 加入 PCL 开发的组织全球地理分布

ensor 3D 设备,微软 Kinect 或者华硕的 XTionPRO 智能交互应用等,详细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 的高性能计算的技术。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 PCL 的潜在应用领域

在这么短时间,为什么? 如此多的组织个人和公司加入到 PCL 开源项目中来, PCL 能解决什么问题呢?

### 1.3.1 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一把“瑞士军刀”。

### 1.3.2 CAD/CAM、逆向工程

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 kd-tree 和 oc-tree 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。

### 1.3.3 激光遥感测量

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解决此问题。

### 1.3.4 虚拟现实、人机交互

虚拟现实技术(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



## 第1章 概述

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。

### 1.4 PCL 在中国

PCL 虽然在国际上有如此多的组织和公司参与,由于发展如此迅速,目前(2012 年 4 月)在 Google 中检索出中文相关的 PCL 探讨,有且只有一条,当然这也是笔者出书原因之一了。事实上,如图 1-2 所示,在全球范围内,唯独中国没有参与组织,这里希望广大读者可以为中国板块上添加一个小旗帜。当然,肯定有科研工作者在应用或者学习 PCL 了,笔者依托于中国农业大学农业部信息获取技术重点实验室,在与创始人 Radu 博士交流后,深感 PCL 在复杂的农业对象中有不可估量的作用,例如对动植物的重建测度、果蔬等分级检测等应用领域,决定把 PCL 作为基础研究平台来开展实际应用。同时用学习笔记撰写了本书把 PCL 与国人分享,相信在不久的将来,与 2D 信息处理库 OpenCV 一样,中国将是 PCL 最大的用户和贡献者基地。

### 1.5 PCL 的结构和内容

PCL 架构图如图 1-3 所示,对于 3D 点云处理来说,PCL 完全是一个模块化的现代 C++ 模板库。其基于以下第三方库:Boost、Eigen、FLANN、VTK、CUDA、OpenNI、QHull,实现点云相关的获取、滤波、分割、配准、检索、特征提取、识别、追踪、曲面重建、可视化等。

PCL 利用 OpenMP、GPU、CUDA 等先进高性能计算技术,通过并行化提高程序实时性。K 近邻搜索操作的构架是基于 FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors)所实现的,速度也是目前技术中最快的。PCL 中的所有模块和算法都是通过 Boost 共享指针来传送数据,因而避免了多次复制系统中已存在的数据的需要,从 0.6 版本开始,PCL 就已经被移入到 Windows、Mac OS 和 Linux 系统,并且在 Android 系统也已经开始投入使用,这使得 PCL 的应用容易移植与多方发布。

从算法的角度,PCL 是指纳入了多种操作点云数据的三维处理算法,其中包括过滤、特征估计、表面重建、模型拟合和分割、定位搜索等。每一套算法都是通过基类

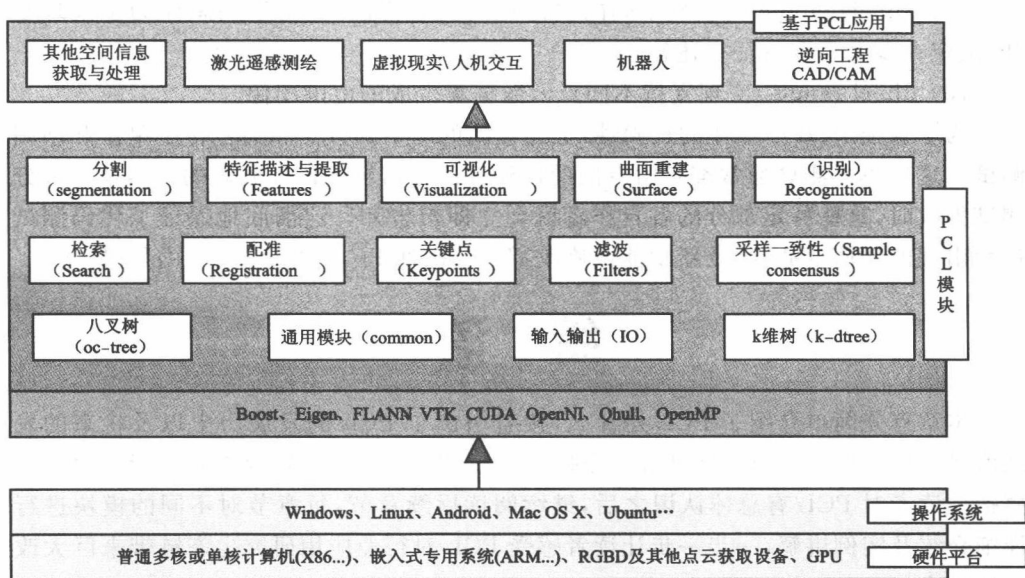


图 1-3 PCL 架构图

进行划分的,试图把贯穿整个流水线处理技术的所有常见功能整合在一起,从而保持了整个算法实现过程中的紧凑和结构清晰,提高代码的重用性、简洁可读。在PCL中一个处理管道的基本接口程序如下:

- (1) 创建处理对象:(例如过滤、特征估计、分割等)。
- (2) 使用 `setInputCloud` 通过输入点云数据,处理模块。
- (3) 设置算法相关参数。
- (4) 调用计算(或过滤、分割等)得到输出。

为了进一步简化和开发,PCL被分成一系列较小的代码库,使其模块化,以便能够单独编译使用提高可配置性,特别适用于嵌入式处理中:

- (1) `libpcl filters`:如采样、去除离群点、特征提取、拟合估计等数据实现过滤器。
- (2) `libpcl features`:实现多种三维特征,如曲面法线、曲率、边界点估计、矩不变量、主曲率,PFH和FPFH特征,旋转图像、积分图像,NARF描述子,RIFT,相对标准偏差,数据强度的筛选等。
- (3) `libpcl I/O`:实现数据的输入和输出操作,例如点云数据文件(PCD)的读/写。
- (4) `libpcl segmentation`:实现聚类提取,如通过采样一致性方法对一系列参数模型(如平面、柱面、球面、直线等)进行模型拟合点云分割提取,提取多边形棱镜内部点云等。
- (5) `libpcl surface`:实现表面重建技术,如网格重建、凸包重建、移动最小二乘法平滑等。
- (6) `libpcl register`:实现点云配准方法,如ICP等。