

The Optimal Registration Method of Point Cloud Model



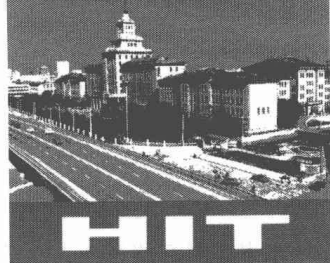
数学·统计学系列

点云模型的优化配准方法研究

赵夫群 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



数学·统计学系列

The Optimal Registration Method of Point Cloud Model

点云模型的优化配准方法研究



● 赵夫群 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍了 9 种点云配准算法以及 3 个点云配准的应用领域。其中,第 1~2 章,主要介绍点云配准的基本概念,点云数据的采集和预处理技术;第 3~11 章,主要介绍 9 种点云配准算法;第 12~14 章,主要介绍点云配准算法在颅面复原、刚体碎块匹配,以及兵马俑复原领域中的应用等内容。

本书适合大学本科程度及以上,对点云配准研究感兴趣的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

点云模型的优化配准方法研究/赵夫群著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2018.7

ISBN 978-7-5603-7382-9

I. ①点… II. ①赵… III. ①数据处理—研究
IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 108811 号

策划编辑 刘培杰 张永芹

责任编辑 张永芹 邵长玲

封面设计 孙茵艾

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨圣铂印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 11.5 字数 210 千字

版 次 2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-7382-9

定 价 58.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

◎ 序 言

随着三维激光扫描软、硬件技术的日趋成熟和大众化,相应的三维点云数据处理技术成为越来越受关注的研究热点。其中,点云配准技术研究已久,其应用领域涉及医学研究、文物修复、颅面复原以及三维重建等多个方面。

全书共 14 章,总计 21 万字,主要介绍了 9 种点云配准算法以及 3 个点云配准的应用领域。其中,第 1 章和第 2 章是基础篇,主要介绍点云配准的基本概念、点云数据的采集和预处理技术;第 3 章至第 11 章是算法篇,主要介绍了 9 种点云配准算法,即基于改进 ICP 的点云配准算法、基于概率迭代最近点的点云配准算法、基于有界旋转角的点云配准算法、一种改进的抗噪点云配准算法、尺度各异的点云配准算法、基于局部特征的点云配准算法、基于 GH-LS3D 的点云配准算法、基于 2D 图像特征点云配准算法,以及一种由粗到精的点云配准算法;第 12 章至第 14 章是应用篇,主要介绍点云配准算法在颅面复原、刚体碎块匹配和秦俑修复中的应用。

本专著在编写过程中得到了咸阳师范学院学术专著出版基金的资助,为咸阳发展研究院服务地方经济社会发展项目(编号 2018XFY007),咸阳师范学院青年骨干教师培养项目(XSYGG201621)的资助,在此一并表示诚挚的谢意!

由于编写时间仓促,书中难免存在疏漏与不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018 年 2 月

咸阳师范学院

第一篇 基础篇

第 1 章	点云配准概述	// 3
1.1	点云配准的概念	// 3
1.2	点云配准的分类	// 4
1.3	点云配准的算法	// 5
1.4	总结与展望	// 8
	参考文献	// 8
第 2 章	点云数据的采集和预处理	// 10
2.1	点云数据的采集	// 10
2.2	点云数据的预处理	// 13
2.3	点云数据的拼合配准	// 15
2.4	总 结	// 16
	参考文献	// 16

第二篇 算法篇

第 3 章	基于改进 ICP 的点云配准算法	// 21
3.1	研究现状	// 21
3.2	粗配准方法	// 22

3.3	精配准方法	//23
3.4	实验与结果分析	//25
3.5	总 结	//26
	参考文献	//26
第4章	基于概率迭代最近点的点云配准算法	//28
4.1	研究现状	//28
4.2	基本 ICP 算法	//29
4.3	PICP 算法	//30
4.4	实验结果与分析	//33
4.5	总 结	//35
	参考文献	//36
第5章	基于有界旋转角的点云配准算法	//38
5.1	研究现状	//38
5.2	初始配准	//39
5.3	改进的 ICP 算法	//40
5.4	实验结果与分析	//43
5.5	总 结	//45
	参考文献	//46
第6章	一种改进的抗噪点云配准算法	//48
6.1	研究现状	//48
6.2	基本 ICP 算法	//49
6.3	概率迭代最近点算法	//50
6.4	概率迭代最近点算法的改进	//53
6.5	实验结果与分析	//54
6.6	总 结	//59
	参考文献	//60
第7章	尺度各异的点云配准算法	//62
7.1	研究现状	//62
7.2	ICP 算法	//63
7.3	SICP 算法	//64

7.4	改进的 SICP 算法	//65
7.5	实验结果与分析	//66
7.6	总 结	//69
	参考文献	//69
第 8 章	基于局部特征的点云配准算法	//71
8.1	研究现状	//71
8.2	局部特征描述子	//72
8.3	粗配准算法	//74
8.4	精配准算法	//75
8.5	实验结果与分析	//77
8.6	结 论	//78
	参考文献	//79
第 9 章	基于 GH-LS3D 的点云配准算法	//81
9.1	研究现状	//81
9.2	基于 GH-LS3D 的粗配准	//82
9.3	基于改进 ICP 算法的精配准	//84
9.4	实验结果与分析	//88
9.5	结 论	//91
	参考文献	//92
第 10 章	基于 2D 图像特征的点云配准算法	//94
10.1	研究现状	//94
10.2	粗配准算法	//95
10.3	3D 点云转换成 2D 图像	//96
10.4	求解 3D 变换矩阵	//97
10.5	实验结果与分析	//99
10.6	结 论	//100
	参考文献	//100
第 11 章	一种由粗到精的点云配准算法	//103
11.1	研究现状	//103
11.2	粗配准	//104

11.3	精配准	//106
11.4	实验结果与分析	//108
11.5	结 论	//110
	参考文献	//110

第三篇 应用篇

第 12 章 点云配准算法在颅面复原中的应用 //115

12.1	颅骨配准的研究现状	//115
12.2	颅骨粗配准	//116
12.3	颅骨精配准	//118
12.4	实验结果与分析	//121
12.5	总 结	//123
	参考文献	//124

第 13 章 点云配准算法在刚体碎块匹配中的应用 //127

13.1	研究现状	//127
13.2	基于显著性区域的粗匹配	//129
13.3	基于改进 ICP 的碎块精匹配	//132
13.4	实验结果与分析	//137
13.5	结 论	//141
	参考文献	//142

第 14 章 点云配准算法在秦俑修复中的应用 //146

14.1	研究背景与意义	//146
14.2	研究现状	//149
14.3	断裂面的粗匹配	//153
14.4	断裂面的精匹配	//154
14.5	实验结果与分析	//157
14.6	总 结	//160
	参考文献	//160

第一篇

基础篇

点云配准概述

【导读】本章简要介绍了三维激光扫描技术、点云配准的概念,并通过研读前人的研究成果,归纳总结了目前的点云数据配准研究状况,指出了当前点云数据配准研究现状中存在的问题,并提出了进一步研究的方向。本章共分4节,1.1介绍点云配准的概念,1.2介绍点云配准的分类,1.3介绍常见的点云配准算法,1.4是本章的总结与展望。

1.1 点云配准的概念

三维激光扫描技术是近年来兴起的一种继GPS技术之后又一次革命性的新型技术,能够快速大量地采集物体表面的三维坐标信息,快速地建立物体的三维影像模型。

地面三维激光扫描仪是一种集成多种高新技术的仪器,它采用非接触式高速激光测量技术,可以在复杂的空间对物体快速扫描,获取激光点接触的物体表面的三维坐标、色彩信息和强度信息。扫描所得数据是由无数个分散的点组成的,因此被称为“点云”。

三维激光扫描仪在扫描过程中,由于受到自身视野、自身几何形状存在的自遮挡,以及现场测量环境等因素的影响,一次扫描无法获取物体表面全部的三维坐标信息,因此,为了获取物体完整的三维模型,需要进行多次不同视角的扫描。由于

从不同视角扫描获得的点云数据都是相对于自己的扫描空间坐标系而言的,为了实现三维建模,需将多个视点下获取的点云数据整合到一个统一坐标系下,这就是点云配准^[1]。

具体来说,点云配准就是指为了得到被测目标的完整数据,将不同视点扫描的点云拼接在同一个扫描坐标系下的过程。也就是找到两个点云之间的对应关系,然后将一个坐标系下的点云转换到另一个坐标系下。配准的主要过程包括寻找同名点对、确定对应关系、解算变换参数矩阵 $\mathbf{R}$ 与 $\mathbf{T}$ 。图 1.1 为点云扫描示意图。在 A 处获取物体 M 的点云数据 P,在 B 处获取物体 M 的点云数据 Q,配准就是将这两个坐标系下的点云数据 P 和 Q 转换到同一个坐标系下。

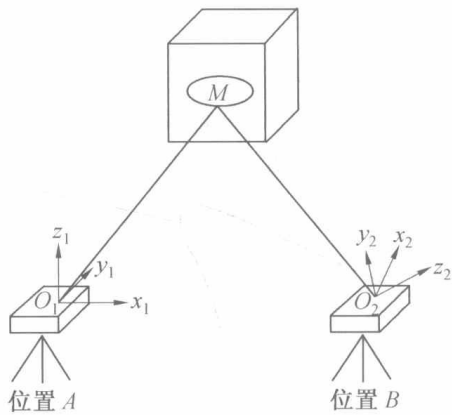


图 1.1 点云配准示意图

1.2 点云配准的分类

点云数据的配准分为多视角配准和两视角配准两种,两视角配准只配准两组点云数据即可,而多视角配准需要配准多组点云数据。但是,配准往往都是通过两两配准的方式实现的,因此两视角配准是点云配准的研究重点。

点云配准是三维建模的一个重要步骤,如图 1.2 所示。通常两个点云的配准分为粗配准和精配准两个步骤。粗配准的目的是减小两组初始点云的旋转误差和平移误差,为精配准提供较好的初始,提高配准的精度和效率。精配准阶段的目的是进一步减小点云配准的误差。当前的点云精配准算法中,运用最广泛的是由 P. J. Besl 等提出的迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP) 算法及其改进算法。

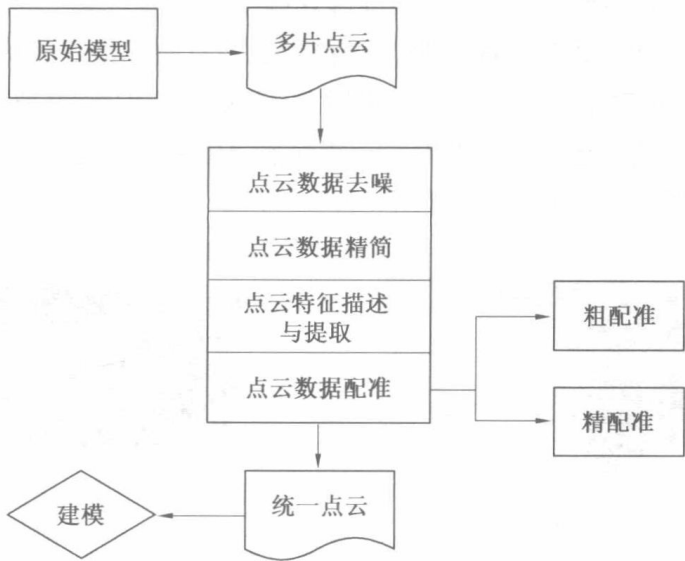


图 1.2 点云处理示意图

1.3 点云配准的算法

根据采用的配准基元,点云配准算法分为两类,即基于特征的点云配准算法和基于无特征的点云配准算法。

1.3.1 基于特征的点云配准算法

基于特征的点云配准算法是指利用物体表面明显的几何特征(如角、点、边缘、面或人为添加的控制标靶等)来解算变换参数。

一般利用特征进行配准可分为 3 个步骤:

- (1) 从原始点云数据中提取特征;
- (2) 选择相似性度量,获取对应特征;
- (3) 点云间变换参数的解算及进行变换。

点特征,如控制点、外部标记点等,是最常采用的配准特征。若利用外部标记点进行配准,在扫描开始之前,在扫描场景周围设置适当数量的控制点或控制标靶,扫描时注意使相邻点云图上有 3 个或 3 个以上的同名控制点或控制标靶。然后在点云中识别这些控制点或控制标靶,利用刚体变换将相邻点云转换至同一坐标系下。目前,利用特征点进行配准有不少的研究成果,如张东等^[2]提出基于罗德里格矩阵的激光扫描点云配准的直接计算方法,用 3 个独立参数

代替 3 个旋转角参数来建立旋转矩阵解算模型,并确定平移参数的计算公式。张凯^[3] 提出基于地理场景的三维激光扫描数据空间配准的方法,采用序列拼接、整体匹配和数据融合的三步配准方案,很好地满足了地理场景的配准需求。曲线和区域也是常用的特征^[4-6],待配准物体的轮廓线特征如图 1.3 所示,区域特征如图 1.4 所示。

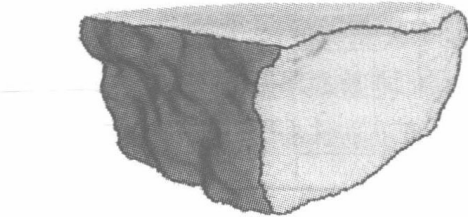


图 1.3 轮廓线特征

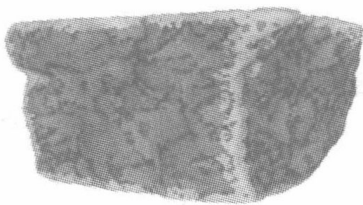


图 1.4 区域特征

基于特征的点云配准算法的优点是不需要知道配准变换参数的初始值,简单易于理解,缺点是需要花费大量的时间在特征的提取及组织上,当物体表面特征不明显时则难以完成配准工作。

1.3.2 基于无特征的点云配准算法

采用基于特征的配准算法需要花费大量的时间进行特征提取,另外配准的精度受特征提取精度的影响,而直接利用原始数据配准则不需要寻找对应特征,因此利用原始数据进行配准成为配准算法的另一个研究方向。

利用原始数据的配准算法中,最经典算法之一就是由 P. J. Besl 等^[7] 提出的迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP) 算法,或称最近点迭代配准算法。该方法不仅适用于点云数据,而且同样适用于其他曲面数据。ICP 算法本质上是基于最小二乘法的最优匹配算法,它重复寻找对应点和最优刚体变换,直到满足某个收敛准则,迭代终止。该算法的目的是找到目标点集与参考点集之间的变换参数矩阵 R 和 T ,使得两点集之间满足某种度量准则下的最优匹配。

ICP 算法的基本思想:先假设一个初始位姿(即位置和姿态)估计,从一个视角扫描获得的点集中选出一定数量的点,再从另一视角的扫描获取点集中寻找与这些点对应的距离最近的点集,通过最优刚体变换,使对应点的点集间距离最小化,通过迭代计算,直到残差平方和所构成的目标函数值不变。

1. ICP 配准算法基本步骤描述如下:

假设给定两个三维点集 P 和 X , P 的对应点集为 Q , C 为对应点的操作。

(1) 初始迭代,先令点集初始位置 $P_0 = P$ 。

(2) 计算点集 X 中的最近点集 $Q_i = C(P_i, X)$ 。

(3) 根据找到的对应点对, 计算变换参数矩阵 R 和 T 。

(4) 根据变换参数矩阵 R 和 T , 计算点集 P 经过刚体变换得到的新的点集 P' 。

(5) 计算点集 P_i 到 P'_i 的距离, 以两次距离平方和之差的绝对值作为迭代收敛条件, 如果小于给定的阈值, 则迭代终止。

2. ICP 算法应用非常广泛, 在于具有以下优点:

(1) 配准精度高;

(2) 可以处理三维点集、隐曲面、参数曲线等多种形式表达的曲面;

(3) 不必对待处理曲面进行分割和特征提取。

3. ICP 算法也有如下的缺点:

(1) ICP 算法要求一个点集必须是另一个点集的子集, 然而在实际扫描过程中, 点云数据彼此之间只是部分重叠, 一个点集完全覆盖另一个点集是很难做到的。

(2) ICP 算法迭代第一步要求确定初始位姿, 初始位姿对最后的配准精度有很大的影响, 如果初始位姿与真实情况相差大, ICP 算法的解很可能陷入局部最优, 因此, 对初始位姿的误差有一定要求。

(3) 算法中使用一个点集的所有点进行点对搜索, 寻找同名点对耗时长、效率低, 甚至还会引进错误的点对。

4. 针对 ICP 算法的缺陷, 近年来研究人员针对该算法进行了大量研究, 提出了多种改进的 ICP 算法^[8-17]。Nishino 把不同的改进差异归结为配准策略、配准基元和误差度量 3 个方面。

(1) 配准策略改进方面

配准策略方面的改进主要集中在提高最近点搜索速度和精度方面, 改进点主要在特征度量和搜索策略上。比如, 使用 kd 树结构对点云数据进行组织管理, 快速搜索最近邻点, 提高了 ICP 算法的配准速度, 同时也提高了精度; 采用点到匹配点处切平面的距离代替 ICP 算法中的点到点的距离, 并且采样点时不采用点集中的所有的点; 搜索最近点时使用最优 kd 树, 为了处理无关点引入松弛变量, 从而提升了 ICP 算法的整体性能。

(2) 配准基元改进方面

配准基元方面的改进主要集中在减少采样点数目方面, 如采取子采样策略, 只对部分点进行最近邻点的搜索。因为传统 ICP 算法是对点集所有点进行最近点搜索, 非常耗时, 并且工作量很大。比如, 基于交替网格的简化算法, 先

进行三角化保留重要特征,然后用简化的集合 P 去匹配集合 X ,再用简化的集合 X 去匹配集合 P ;使用一致采样法;使用随机采样方法,并且每次迭代使用不同的采样点;通过使法向量的分布最大化的方法进行采样;利用图像的梯度信息来筛选符合要求的点,只用筛选出的点进行配准。

(3) 误差度量改进方面

误差度量方面的改进通常是利用各种限制条件将错误的对应点删除,或者在变换参数计算时采用稳健的配准标准及解算方法。比如,通过求解点到三角面片最近距离的方法,提高点的一一对应性,来提高配准精度;用四元组的方法估计变换参数,在寻找相对应的点的步骤中,引入了查找矩阵的概念,通过查找距离矩阵来保证获得唯一的匹配;带有自适应距离阈值的 ICP 算法,距离阈值可以过滤掉不合理的对应点对,并使用最小二乘法误差来限定最终配准的精度。

1.4 总结与展望

三维激光扫描应用于三维重建是目前的新兴技术,三维建模过程中点云配准是其中一个重要的部分,近年来得到了广泛的关注。从目前的研究状况来看,配准方法基本趋于将两种方法混合使用,以几何特征为预配准条件,然后再进行配准的迭代计算,虽然已经取得不错的配准精度和速度,但点云配准算法的适普性仍然需要进一步提高。

在实际扫描过程中,不可避免地存在噪声点,大量的噪声点对配准的精度和效率有很大影响,因此怎样有效减少数据的冗余点是一个研究方向。另外,虽然点云的配准在不同的应用领域都有类似的解决途径,但几乎所有配准算法对配准初值都有较高的要求,因此在点云数据存在噪声点、几何特征不明显、不容易在实际场景布设靶标等情况下,如何从点云数据中自动筛选和比较准确地确定起算数据,仍然是一个需要继续研究的问题。

参考文献

[1] HORN B K P. Shape from shading: a method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology,1970.

[2] 张东,黄腾. 基于罗德里格矩阵的三维激光扫描点云配准算法[J]. 测绘科

- 学,2012(1):156-158.
- [3] 张凯. 三维激光扫描数据的空间配准研究[D]. 南京:南京师范大学,2008.
- [4] YANG R,AUEN P K. Registrating,integrating and building CAD model from range data[C]//Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento:IEEE, 1998(1):3115-3120.
- [5] 何文锋. 大型场景三维重建中深度图像配准[D]. 北京:北京大学,2004.
- [6] BAE K H,D D L. Automated registration of unorganized point clouds from terrestrial laser scanner[J]. IS-PRS Congress Commission, 2004(5):1-32.
- [7] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1992, 14(2): 239-256.
- [8] 高珊珊. 基于三维激光扫描仪的点云配准[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [9] 官云兰,贾凤海. 地面三维激光扫描多站点云数据配准新方法[J]. 中国矿业大学学报,2013(9): 880-885.
- [10] 张剑清,翟瑞芳,郑顺义. 激光扫描多三维视图的全自动无缝镶嵌[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007(2): 100-103.
- [11] 邹际祥. 基于 kd-tree 加速的点云数据配准技术研究[D]. 合肥:安徽大学,2013.
- [12] CHEN Y, GERARD M. Object modeling by registration of multiple range images[C]//Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento: IEEE, 1991(4): 2724-2729.
- [13] LIU Y. Automatic registration of overlapping 3D point clouds using closest points[J]. Image and Vision Computing,2006,24(7): 762-781.
- [14] 罗先波,钟约先,李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,(8): 1104-1106.
- [15] ALMHDIE A, LEGER C, DERICHE M,et al. 3D registration using a new implementation of the ICP algorithm based on a comprehensive lookup matrix: application to medical imaging[J]. Pattern Recognition Letters,2007,28(12): 1523-1533.
- [16] 孟禹. 基于采样球和 ICP 算法的点云配准方法研究[D]. 北京:清华大学,2012.
- [17] 张蒙. 基于改进的 ICP 算法的点云配准技术[D]. 天津:天津大学,2012.