

# 三维点云 ICP 算法改进研究

周春艳, 李 勇, 邹峥嵘

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 三维激光扫描技术的快速发展,使其在各个领域得到广泛应用。由于物理上的一些限制,一次三维激光扫描不能获取扫描物体的全部数据,因此要对扫描点云进行拼接。首先,对最常用的 ICP 算法进行一系列研究,ICP 算法的前提条件是具有良好的配准初值,文中在配准初值的选取上采用主成分分析法,为后续 ICP 算法的工作提供一个良好前提条件,增加点集预处理,点对查找上增加各种限制,采用 kd-tree 加速查找,以此对算法进行改进,并通过实例来验证本算法的有效性及其合理性。

**关键词:** ICP 算法; 三维扫描; 数据配准; 点云

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2011)08-0075-03

## Three - Dimensional Cloud ICP Algorithm Improvement

ZHOU Chun-yan, LI Yong, ZOU Zheng-rong

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Rapid development of three-dimensional laser scanning technology is to make it wider application in all fields. Due to physical limits, a three-dimensional laser scanning can't acquire all the data object, so to scanning point clouds for stitching. First of all, conduct a series of studies on ICP algorithm most frequently used in this document, a prerequisite for ICP algorithm is a good registration of initial value, the article on registration of initial value selection uses principal component analysis method, as the follow-up work to provide a good prerequisite of ICP algorithm to increase point of pretreatment and to seek to increase various restrictions, kd-tree acceleratedly finds to improve algorithm, and through an instance to verify the validity of this algorithm and rationality.

**Key words:** ICP algorithm; three-dimensional scanning; data registration; points cloud

## 0 引 言

三维点云激光扫描技术得到飞速发展,其在各个领域得到广泛应用,最为典型的是建筑物修复、考古等领域。三维激光扫描技术能获得建筑物的三维信息和纹理信息,从而可以建立建筑物的三维模型,为建筑物的修复提供重要依据。因为三维激光扫描设备在扫描时存在视野上的限制、物体自身复杂的几何形状等原因,所以产生的遮挡现象而使得物体的背面等被遮部分测量不到,不可能在同一个视点位置获取物体全部点云信息。为了得到被测物体完整的点云数据,需要从多个角度对物体进行扫描处理,从不同视角扫描得到的每一幅点云数据都是相对于自己的扫描空间坐标系而言的,问题是如何将不同视角下的点云数据统一到一个坐标系统中,这就是所谓的点云的配准<sup>[1]</sup>。因此,研究应用三维激光点云配准算法显得十分重要。

20 世纪 80 年代,许多学者对点云配准进行了大量研究。其中,贡献最为突出的是 Besl P J 等人<sup>[2]</sup>提出的迭代最近点(Iterative Closest Points, ICP)算法,该方法通过寻找两个点集的对应匹配点之间的关系,计算两个点集的变换参数,以满足给定的收敛精度,最终求得两个点集之间的平移和旋转参数,来完成配准过程。传统 ICP 算法存在的问题是,将实际情况太过理想化,在现实扫描过程中,两个点集完全相同是比较难做到的,同时,点云配准计算速度对于现有的计算机也是一个很大的挑战。现在许多算法都是在 ICP 算法的基础上进行改进。ICP 算法存在一些问题<sup>[3]</sup>,其中在进行 ICP 算法第一步要确定一个迭代初值,选取的初值将对最后配准结果产生重要的影响,如果初值选择不合适,算法可能会陷入局部最优,使得迭代不能收敛到正确的配准结果。每一次迭代都是在找到点对的情况进行的,这将对收敛速度产生影响,所以查找点对的速度,是收敛过程中的一个关键环节。基于以上情况,文中给出一种改进的 ICP 算法,并且通过具体实例加以验证其有效性。

收稿日期:2011-01-15;修回日期:2011-04-19

基金项目:国家自然科学基金(6107187)

作者简介:周春艳(1965-),女,硕士,副教授,主要研究方向为数字图像处理、三维激光扫描等。

## 1 点云配准算法的改进

### 1.1 传统的 ICP 算法

能够使不同的坐标下的点云数据合并到同一个坐标系中,首先是找到一个可用的变换,配准操作实际上是要找到从坐标系 coord1 到坐标系 coord2 的一个刚性变换。如果用一个  $3 \times 3$  的旋转矩阵  $R$  和一个 3 维平移向量  $t$  来描述这个变换,对于 coord1 中的任意一点  $p$  设其坐标系 coord1 和坐标系 coord2 中的坐标值分别为  $(x_p^1, y_p^1, z_p^1)$ , 都满足如下条件:

$$\begin{bmatrix} x_p^2 \\ y_p^2 \\ z_p^2 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_p^1 \\ y_p^1 \\ z_p^1 \end{bmatrix} + t$$

ICP 算法用来解决多视点云间的对齐问题,前面已经提到 ICP 算法的由来,现在介绍一下 ICP 算法的实现过程,ICP 算法本质上是基于最小二乘法的最优配准方法。该算法重复进行选择对应关系点对,计算最优刚性变换这一过程,直到满足正确配准的收敛精度要求。多视点云对齐的数学定义可以这样描述:给定两个来自不同坐标系的三维数据点集,找到两个点集空间的变换关系,使得两个点集能统一到同一坐标系中,即配准过程。假定用  $\{P_i | P_i \in R^3, i=1, 2, \dots, N\}$  表示第 1 个点集,第 2 个点集表示为  $\{Q_i | Q_i \in R^3, i=1, 2, \dots, M\}$ , 2 个点集的对齐配准转换为使下列目标函数<sup>[4]</sup>最小。

$$f(R, T) = \sum_{i=1}^n ||P_i^k - (RP_i + T)||^2 = \min \quad (1)$$

ICP 算法的目的是要找到待配准点云数据与参考点云数据之间的旋转参数  $R$  和平移参数  $T$ , 使得两点集数据之间满足某种度量准则下的最优匹配。假设给定两个三维点集  $X_1$  和  $X_2$ , ICP 方法的配准步骤如下所示:

第一步,计算  $X_2$  中的每一个点在  $X_1$  点集中的对应最近点;

第二步,求得使上述对应点对平均距离最小的刚性变换,求得平移参数和旋转参数;

第三步,对  $X_2$  使用上一步求得的平移和旋转参数,得到新的变换点集;

第四步,如果新的变换点集与参考点集满足(1)式目标函数要求,即两点集的平均距离小于某一给定阈值,则停止迭代计算,否则新的变换点集作为新的  $X_2$  继续迭代,直到达到目标函数的要求。

ICP 算法是一种迭代算法,具有很高的匹配精度,由上述过程可知,该算法存在计算量较大的缺点,可能使得迭代过程无法收敛到全局最优解。

### 1.2 改进的 ICP 算法

由于 ICP 算法是基于迭代的算法,因此在查找两幅点云之间的对应点时,速度比较慢,当配准工作量很大时,这样的速度并不能满足实际需要,而且 ICP 算法要求占云的初始位置不能相差太大,否则会陷入局部最优解,在实际扫描过程中,不能总是保证所有点云都符合这个要求。由于传统方法存在的缺点,所以需要传统算法加以改进,在传统算法中,配准方法就是一个迭代过程,其实在传统 ICP 算法中存在一个初值选取问题,前面也提到过,如果初值选取不当,将会造成迭代收敛不到正确的结果,所以在改进的方法中,将配准过程分为两步,第一步为粗配准,第二步为精配准。

在利用激光扫描仪取得物体点云数据时,除了主要扫描对象,扫描范围内的其它物体也会被扫描。在三维激光扫描数据内去除其它物体,就会因遮挡而在主要扫描对象上产生数据空洞,所以去除噪声的同时,还需要填补空洞数据<sup>[5,6]</sup>。

粗配准过程中,采用 PCA (Principal Component Analysis, 主成分分析)<sup>[7]</sup> 算法完成粗配准。该方法是一种有效的检测数据集简化方法,可用于减少数据集的维数,保持数据集对方差贡献最大特征。PCA 反映了数据集相似度大的两片点云,只要把参考坐标系调整到一致,即可达到初始配准目的,由于可能出现坐标轴的两个向相差  $180^\circ$  的情况,需要建立最小包围盒来测试两处点云是否重合,可以通过变换坐标将数据点云包围盒变换到模型点云参考坐标系中,使两包围盒的位置大体一致,为精确配准提供了一个比较好的初始值。

为了提高 ICP 算法的可靠性和鲁棒性,从匹配点的选择到最小二乘度量目标函数的选取等 ICP 匹配算法中的各个阶段,许多学者提出了各种的优化算法<sup>[8]</sup>, ICP 算法的各个阶段划分如下<sup>[9]</sup>:

第一步,匹配模型中进行匹配的数据点的选取采样。

第二步,两模型中有对应关系的匹配点的选择。

第三步,匹配点对的适当权值选取。

第四步,去除部分错误匹配的点对。

第五步,迭代停止度量准则的选择。

第六步,最优化方法的选择。

精配准过程中,文中对 ICP 算法的改进主要集中于以下几个方面:

(1) 点集预处理。因为扫描过程中,包括物体背景也被扫描进入物体数据点云中,所以应该想办法去除目标物体点云的背景点云部分,同时还需要过滤掉与扫描仪距离较远且精度较低的数据点,从而避免由于边缘点误差造成的整体匹配效果下降问题,文中使

用人工去除背景点云,操作方便,效果良好。

(2)控制点的选择。如果数据点位于两块待配准点云的重叠区域就有可能找到对应点,而对于那些非重叠区域的点肯定无法找到准确的对应点,原始的 ICP 算法就是基于这种假设的,然而,在两块点云的配准过程中,两块点云之间只有部分重叠区域,这种假设是不成立的,因此,在开始进行配准之前,有必要按照一定的策略对点云图像进行重采样确定控制点。三维激光扫描数据经过重新采样后,可得到更小的数据量或者更可靠的点集合,称为控制点集合。用控制点进行后面的计算不仅减少了参与计算的点,同时减小计算时间。标准 ICP 算法并不会对点集进行重采样,可以有效地加速配准过程,这就是说,标准 ICP 算法利用点集合中的所有点来参与计算。

(3)最近点对查找。对应点的计算是整个配准过程中耗费时间最长的步骤。文中利用欧氏距离作为最近点选择的度量,查找最近点,利用  $k-d$  tree<sup>[10,11]</sup> 提高查找速度。 $K-d$  tree 法建立点的拓扑关系是基于二叉树的坐标轴分割,构造  $k-d$  tree 的过程就是按照二叉树法则生成,首先按  $X$  轴寻找分割线,即计算所有点的  $x$  值的平均值,以最接近这个平均值的点的  $x$  值将空间分成两部分,然后在分成的子空间中按  $Y$  轴寻找分割线,将其各分成两部分,分割好的子空间在按  $X$  轴分割……依此类推,最后直到分割的区域内只有一个点。这样的分割过程就对应于一个二叉树,二叉树的分节点就对应一条分割线,而二叉树的每个叶子节点就对应一个点。这样点的拓扑关系就建立了。

(4)去除错误匹配点对。为了提高最小平方距离度量函数的性能,必需去除错误匹配点对。对于每个点  $x$ ,在另一块对应点云中总能找到最近点  $y$ 。但是,由于机器的分辨力限制,两点云图像中存在许多虚假的点,可以附加一些限制条件去除这些虚假的点,以下有两个简单的限制条件,第一个限制条件是最大距离限制,如果点  $x$  与最近点  $y$  之间的距离,即  $d(x,y)$  大于最大距离限制  $D_{max}$ ,第二个限制是方向的一致性,点  $x$  的切线与它最近点的切线的夹角不能超过预先设定的值。文中去除两点距离大于某一给定值的点对,同时还去除包含了点云模型边界点的点对。在两模型不完全重叠时,采用上述方法对去除错误匹配点对非常有效。同时,在大多数情况下,不会对匹配带来不良的后果。

2 改进 ICP 验证

本次实验使用加拿大 Optech 公司生产的 ILRIS-3D 三维激光扫描仪<sup>[12]</sup>获取的点云数据。实验平台,在 Intel Pentium 4 CPU 3.06GHz 主频 512M 内存的计

算机上使用 Visual C++ 实现,首先在距离人船模型约 20m 处设置测站 1,扫描平均间隔设置为 5.7mm,获得含有 1265264 个点的三维点云数据。在离人船模型约 20m 处设置站 2,扫描平均间隔 6.67mm,获得含有 1011295 个点的三维点云数据,图 1 为测站 1 扫描所得图像。



图 1 测站 1 点云  
配准前两点云图像为图 2 所示。



图 2 两测站点云  
配准后图像见图 3。



图 3 配准点云

点云配准过程中,传统 ICP 与文中改进 ICP 算法比较如表 1。表 2 为不同点云数据之间的对比。

表 1 ICP 数据对比

	配准时间	收敛值
文中改进 ICP 算法	2.96s	0.010762
传统算法	212.92s	0.011345

表 2 多组数据比较

点云	文中 ICP 算法		传统算法	
	配准时间(s)	收敛值	配准时间(s)	收敛值
亭子(2682747 点)	6.78	0.012351	240.83	0.011985
圆球雕塑(542266 点)	2.79	0.012114	190.47	0.012432
钟楼(4348125 点)	2.43	0.011835	160.33	0.011663

表 1,表 2 说明本算法在收敛值相差不大的情况  
(下转第 81 页)

出改进变换矩阵和旋转坐标轴可以减小失真,提高重建的稳定性和精确性。

#### 4 结束语

在分析传统 SFS 算法的基础上,综合运用计算机视觉、图像处理和计算机辅助几何设计理论与技术,提出了一种简单可靠的改进 SFS 算法,可以通过单幅图像恢复出物体的三维形状。改进的 SFS 算法适用于更广泛的物体表面重建和各种光照条件,能够克服传统 SFS 算法精度低的缺陷,提高了三维重建的稳定性和精确度,缩短了三维重建的时间,此算法在实际应用中表现出很好的效果。然而,由单幅二维图像重建出物体三维形状技术一直是图像领域研究的难点,主要表现在现有方法重构精度较低、图像反射图方程的迭代求解容易发散以及光照易受到干扰等难以解决的问题,整个理论体系还不完善,新的更有效的 SFS 算法值得去探究。

#### 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]. Massachusetts Inst. of Technology, 1970.
- [2] 胡志勇,张秀芬,蔚刚,等.基于灰度图像的三维曲面重建系统设计[J].计算机技术与发展,2007,17(10):61-

(上接第77页)

下,速度得到明显提升。

#### 3 结束语

文中采用 PCA 算法来使两块点云获得一个粗配准的过程,在粗配准过程后获取一个初值,使得下一步中获得较好的初值,为下一步工作打下良好基础,同时使得配准不限入局部最优解,同时对点云数据进行点集预处理,其中包括去除背景点云数据,对点云进行随机重采样,减少点云数据量,对控制点进行重新选择,采用 k-d tree 加速查找点对过程,明显提高了查询最近点的速度,缺点是 k-d tree 需要非常大的计算量,查找过程中使用距离来限定点对,去除错误的点对,并获得较好的实验结果,表明算法的稳定、有效。

#### 参考文献:

- [1] 张爱武,孙卫东,葛成辉,等.室外大型场景多机位三维数据全局快速配准[J].高技术通讯,2004,14(6):6-13.
- [2] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(2):239-256.

64.

- [3] 韩兆君.单幅图像的建模技术研究[D].青岛:青岛大学,2009:29-34.
- [4] 谢路生.基于 SFS 的三维测量技术[D].厦门:厦门大学,2009.
- [5] 李健,梁琨.基于明暗恢复法的三维重建算法分析[J].微计算机信息,2006,8(1):202-204.
- [6] Zheng Q, Chellappa R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading[J]. IEEE Trans. on PAMI, 1991,13(7):680-702.
- [7] Pentland A P. Local shading analysis[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984,6:170-187.
- [8] Lee C H R A. Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system[J]. Artificial Intelligence, 1985(26):125-143.
- [9] Tsai P S, Shah M. Shape from Shading Using Linear Approximation[J]. Image and Vision Computing J., 1994,12(8):487-498.
- [10] 廖熠,赵荣椿.从明暗恢复形状(SFS)的几类典型算法分析与评价[J].中国图像图形处理学报,2001,6(10):953-961.
- [11] 马银平,李建英,宣亮亮.基于粗糙表面模型的三维形貌恢复研究[J].计算机技术与发展,2009,19(7):102-104.
- [12] Ikeda O. A Novel Shape-From-Shading Algorithm Using Jacobi Iterative Method and Bi-Directional Estimation[C]//Proc. IASTED CGIM. [s.l.]:[s.n.], 2002.
- [3] 王建文,王敏.基于双目立体视觉的鞋楦三维建模[J].计算机技术与发展,2009,19(4):224-230.
- [4] 金涛,童水光,颜永年.逆向工程技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [5] 刘江涛,张爱武,臧克.3维数字化技术在考古中的应用[J].中国图象图形学报,2008(4):654-657.
- [6] 郑德华. ICP 算法及其在建筑物扫描点云数据配准中的应用[J].测绘科学,2007(2):31-32.
- [7] 张广鹏,张艳宁,郭哲.基于精确主轴分析及 ICP 的三维人脸配准[J].计算机工程与应用,2006,42(29):62-64.
- [8] 郭祥,刘卉.三维激光扫描技术及其在地质中的应用展望[J].软件导刊,2009(3):183-185.
- [9] 潘小林.三维曲面匹配技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2004.
- [10] Pulli K. Multi-view registration for large data sets [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. Ottawa: [s.n.], 1999:160-168.
- [11] Preparata F, Shamos M. Computational Geometry: An Introduction [M]. New York: Springer; Berline: Heidelberg, 1986.
- [12] 刘江涛,张爱武.三维数字化技术在三星堆遗址中的应用[J].首都师范大学学报(自然科学版),2007(4):68-71.