

# ICP 算法在文物三维重建中的应用

刘保安

(塔里木大学 信息工程学院, 新疆 阿拉尔市 843300)

**摘要:** 三维结构光扫描技术作为一种新型的三维数据获取技术,被广泛应用于文物的三维重建中。目前,这项技术在数据获取方面有很多优势,但是在点云数据配准方面还有一些需要优化的地方,特别是在处理大量点数据,为保证配准结果的精确性,就需要对点云数据的配准算法进行优化。利用手持式三维结构光扫描仪获取文物三维数据,在 Artec studio9 软件中将原始三维数据以 ply 格式导出为原始点云数据,然后基于 Matlab 软件对 ICP 算法通过编程优化,将原始点云数据再通过优化后的 ICP 算法进行配准,得到文物三维模型的构建数据。实验分析表明,优化后的 ICP 配准算法不但能提升配准精确度,而且可以保证配准方向的合理性,使得配准得到更佳的效果。

**关键词:** 三维结构光扫描;配准;ICP 算法;点云

**中图分类号:** TP39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2020)01-0217-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-629X.2020.01.039

## Application of ICP Algorithm in Three-dimensional Reconstruction of Cultural Relics

LIU Bao-an

(School of Information Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

**Abstract:** As a new kind of three-dimensional data acquisition technology, the three-dimensional structured light scanning technology is widely used in three-dimensional reconstruction of the cultural relics. At present, this technology has many advantages in data acquisition, but there are still some areas need to be optimized in point cloud data registration, especially in dealing with a large number of points. In order to ensure the accuracy of registration results, it is necessary to optimize the registration algorithm of point cloud data. Hand held three-dimensional structured light scanner can be used to collect the three-dimensional data of cultural relics, and in the Artec studio 9 software, the original data will be exported as the original point cloud data in ply format. And then, based on Matlab, the ICP algorithm is optimized by programming. The original point cloud data are registered by the optimized ICP algorithm, and the construction data of the three-dimensional model of cultural relics are obtained. Experimental analysis shows that the improved ICP registration algorithm can not only greatly improve the registration accuracy but also guarantee the rationality of registration direction to achieve better effect of registration.

**Key words:** three-dimensional structured light scanning; registration; ICP algorithm; point cloud

## 0 引言

三维结构光扫描技术以扫描速度快、精度高等优势,在文物保护方面应用广泛。目前利用三维结构光扫描仪建立三维模型是一种有效的手段,而点云数据的配准是三维建模的关键技术,在医学、逆向工程、文物保护等方面起到了关键作用。用三维结构光扫描获取到目标物体表面的大量点云数据,即物体的三维图像。光在同种均匀介质中沿直线传播,因此,光学测量

仪器常常仅能测量到物体局部坐标系下的局部数据,并且数据会出现平移、旋转错位<sup>[1]</sup>等现象,需要对这些表面数据进行配准。因此,点云的配准显得尤为重要,特别是文物点云与原始模型的配准,将直接影响文物三维模型精确度<sup>[2]</sup>。

由 P. J. Besl<sup>[3]</sup>、Arun<sup>[4]</sup>等提出的迭代最近点算法(iterative closest points, ICP)目前被广泛应用,近年来国内外也有大量的研究者对该算法进行探索<sup>[5-7]</sup>。

收稿日期:2019-02-24

修回日期:2019-06-24

网络出版时间:2019-09-25

基金项目:2016 年新疆生产建设兵团(省部级)公共服务平台建设项目(2016AE010 2016-2018)

作者简介:刘保安(1989-),男,研究生,研究方向为计算机视觉。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190925.1520.012.html>

ICP 算法实质上是基于最小二乘法的最优配准方法。该算法对对应关系点对反复进行选择,计算最优刚体变换这一过程,一直到符合正确配准的收敛精度条件<sup>[8]</sup>。

基于 ICP 算法的特性,对获取的原始点云数据先通过旋转矩阵和平移向量实现粗配准,在 Matlab 软件中使用 ICP 算法对点云数据进行精确配准,从而提高配准的准确性和效率。

## 1 点云数据的获取过程

按照点云的数据获取测量方法的不同与测量设备是否接触物体,基本上分为两大类:接触式测量与非接触式测量<sup>[9]</sup>。手持式三维结构光扫描仪属于非接触式测量方式。在数据的获取过程中,首先利用 Artec Eva 3D 手持式结构光扫描仪获取陶罐数据,其次将扫描仪中的数据导入图像工作站的 Artec studio 9 软件中。为使导出的数据原属性不受影响,包括颜色、曲面法线、纹理坐标等<sup>[10]</sup>,便于三维网格数据在 Matlab 中的输入、处理<sup>[11]</sup>,且为后续处理奠定良好的基础,需要一种便于处理的输出格式。ply 格式以数据结构简单、易于读取,可以用 ASCII 码格式存储文件等特点而得到了广泛的应用<sup>[12]</sup>。基于它的优点,利用该软件将获取的点云数据以 ply 格式导出<sup>[13]</sup>,获取初始数据。

## 2 ICP 算法

### 2.1 基本原理

基本原理是根据空间几何变换使数据完成配对,选取待配准点云,运用最小二乘法的优化思想<sup>[3]</sup>,其核心内容是:让点云数据旋转、平移,使得两个点集之间的距离最小<sup>[14]</sup>。文中基于四元数方法<sup>[15]</sup>来求解旋转矩阵和平移矩阵。

### 2.2 配准算法

(1) 使用四元数来表示旋转关系:  $\vec{q}_R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ , 符合条件:  $q_0 \geq 0$ 、 $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ , 因为  $[x \ y \ z]^T$  是代表点的坐标,假如要对其做某个旋转或平移变换,则不能用四元数来表示。因此,要通过以下的公式获得四元数所表示的旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_{\vec{q}_R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_2q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

平移向量可以表示为:

$$\mathbf{T} = [q_4 \ q_5 \ q_6]^T \quad (2)$$

假如等待配准的点集为:  $P = \{\vec{p}_i\}$ ; 模板点集为:  $X = \{\vec{x}_i\}$ 。对每个点最近的匹配点,在带配准的点集 PP 和模板点集 XX 中提取出来,以欧氏距离来度量配准距离<sup>[16]</sup>。要从模板点集 XX 与点集 PP 中找出对应每个点的欧氏距离,配准取最小欧氏距离的点,并且把新的对应点集  $P$  作为对应点再次带入。

(2) 对于两个点集之间的度量,使用如下目标函数表示:

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\vec{x}_i - \mathbf{R}_{\vec{q}} \vec{p}_i - \mathbf{T}\|^2 \quad (3)$$

其中,  $\vec{q}$  为四元数变量;  $\mathbf{R}_{\vec{q}}$  为将四元数转换为旋转矩阵的形式;  $\mathbf{T}$  为前面定义的平移矩阵;  $\vec{x}_i$  为模板点集 X 中某个点的坐标;  $\vec{p}_i$  为对应点集 P 中对应点的坐标。

其实运算上一个目标函数最小值的过程:  $\min f(\vec{q})$ , 就是求解 ICP 的运算。每一次迭代运算,都求解能得到  $f(\vec{q})$  更小的迭代收敛后返回的  $\vec{q}$ , 即为最终配准后的结果。

最小化问题,算法流程如下:

(3) 设点集 P 和点集 X 的中心点分别为  $\vec{\mu}_p$  和  $\vec{\mu}_x$ :

$$\begin{cases} \vec{\mu}_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \vec{p}_i \\ \vec{\mu}_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \vec{x}_i \end{cases} \quad (4)$$

对点集 P 和点集 X 做去中心化处理后,求出其协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \Sigma_{px} &= \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(\vec{p}_i - \vec{\mu}_p)(\vec{x}_i - \vec{\mu}_x)^T] = \\ &\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\vec{p}_i \vec{x}_i^T) - \vec{\mu}_p \vec{\mu}_x^T \end{aligned} \quad (5)$$

令对称矩阵为:

$$\mathbf{A}_{ij} = (\Sigma_{ij} - \Sigma_{ij}^T)_{ij} \quad (6)$$

由此得到列向量:

$$\Delta = [A_{23} \ A_{31} \ A_{12}]^T \quad (7)$$

利用该列向量构建 4×4 对称矩阵:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \text{tr}(\Sigma_{px}) & \Delta^T \\ \Delta & \Sigma_{px} + \Sigma_{px}^T - \text{tr}(\Sigma_{px}) \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\text{tr}(\Sigma_{px})$  表示矩阵  $\Sigma_{px}$  的迹,即主对角线元素的总和,也即特征值之和;  $\mathbf{I}_3$  表示 3×3 单位矩阵。将式 7 套入式 8 中,即在程序中直接使用上面这个公式。

(4) 对式 9 中特征值  $q$  进行分解,得到最大和的特征值和对应的特征向量,特征向量就对应误差的平方

及最小时的四元数:

$$\vec{q} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T \tag{9}$$

计算最佳平移向量:

$$\vec{T} = \vec{\mu}_x - \vec{R}_{q_k} \vec{\mu}_p \tag{10}$$

使用上式的四元数套入式 1:

$$\vec{R}_{q_k} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_2q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

如下式,结果到最小值时停止迭代,否则继续重复流程 1~4。

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \| \vec{x}_i - \vec{R}_q \vec{p}_i - \vec{T} \|^2 \tag{11}$$

3 实验数据以及应用效果

为验证文中提出的改进 ICP 算法的效果,在 Intel (R) Core(TM) i7-2760QM CPU 主频为 2.40 GHz,内存 12 GB,Windows7 64 位操作系统图形工作站上,基于 Artec Studio 9 版本三维扫描软件,搭载 Artec Eva 3D 扫描仪实验平台中获取陶罐的三维点云数据;在 Intel(R)Core(TM) i5-5200U 主频 2.20 GHz,内存 4 GB,Windows 7 64 位操作系统的计算机上用 Matlab 进行仿真实验。

由图 1 可知,仅用原始 ICP 配准会导致配准精度不理想,获得三维模精度效果不佳。

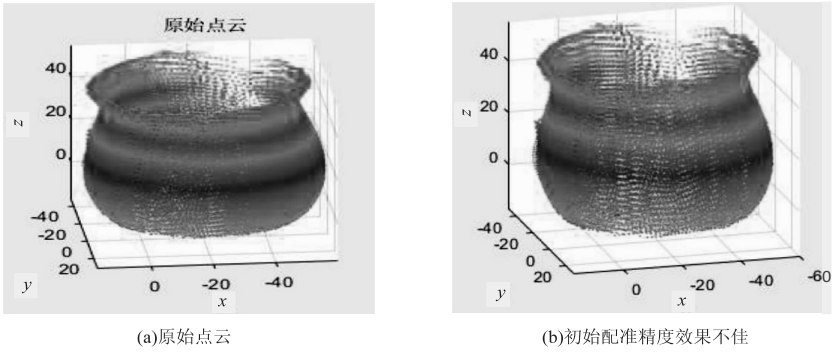


图 1 仅用初始配准的点云数据对齐

由图 2 可知,直接使用 Matlab 中 ICP 算法配准会使得配准趋向于一个错误的方向,致使无法得到良好的配准效果。

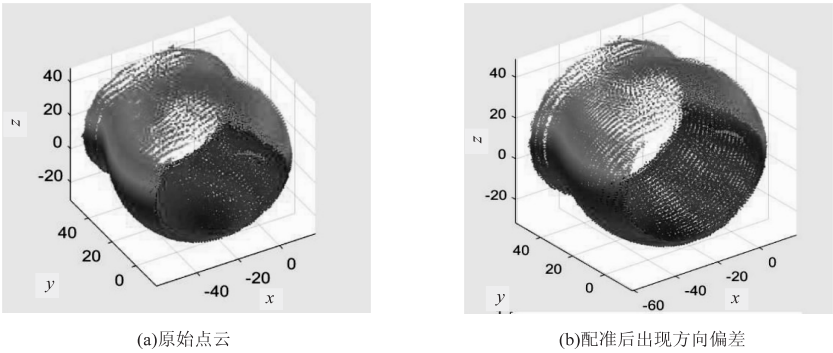


图 2 仅用精确配准的点云数据对齐

利用 pcregrigid 函数对 ICP 算法进行优化,得到表 1 的数据。将数据在 Matlab 中运行,结果如图 3 所示。由图 3 可知,先进行初始配准,再进行精确配准,不但可以大幅度提高配准精确度,并且能确保配准方向的合理性,可以获得更大的配准效果。

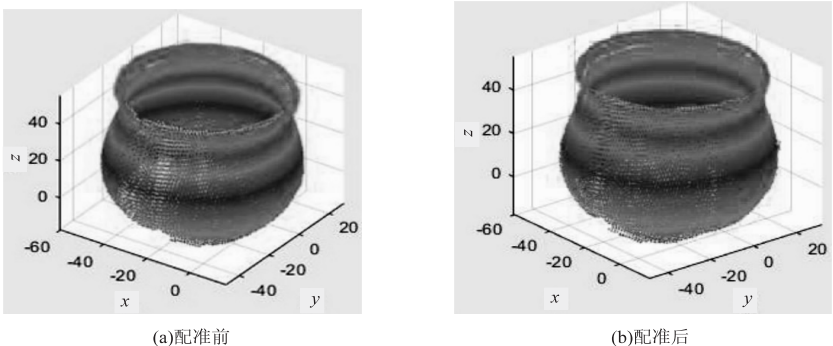


图 3 数据使用文中配准算法后的效果

在 Matlab 中用优化 ICP 算法进行点云数据的配准,不但拥有良好的配准精度,而且匹配速度也令人满意。与原始的 ICP 算法相比,在 Matlab 中编程优化后的 ICP 算法,相比于 Artec Studio 软件中进行的数据配

准有了一定的提高,同时也提升了配准效果。  
由表 1 中的比较分析可以看出,点云数据的数据量越大,在 Matlab 中用优化的 ICP 算法在配准速度上的优势越明显。

表 1 海量数据两种点云算法配准速度的比较

读取的数据点数	配准所需时间/s	
	原始的 ICP 算法	Matlab 中优化 ICP 算法
13 466	3.195 3	0.428 68
25 331	4.567 1	0.973 56
123 199	23.019 4	4.469 8
249 548	73.202 8	11.609 5
633 188	167.374 5	31.751 4
758 652	>200	37.497 7
1 010 275	>200	51.120 9

4 结束语

利用三维结构光技术获取文物的原始数据,经过前期数据的处理获得点云数据,在 Matlab 中利用 ICP 算法进行初步配准,得到基本模型,利用 pciregrigid 函数对 ICP 算法进行优化,通过实验发现文物的配准精度得到大幅度提高,而且减少了配准所需时间。实验结果表明,经过 ICP 算法优化后的三维模型比三维扫描自带 Artec Studio 软件点云数据自动配准更加精确。

参考文献:

[1] 杨现辉,王惠南. ICP 算法在 3D 点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真,2010,27(8):235-238.

[2] 杨璐璟. 点云数据的压缩算法研究—以数字地质博物馆为例[D]. 长沙:中南大学,2014.

[3] BESL P J,MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,1992,14(2):239-256.

[4] ARUN K S,HUANG T S,BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-d point sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1987,9(5):698-700.

[5] 邱世聪,罗意. 改进 ICP 算法的点云配准[J]. 河南科技,2017(7):40-42.

[6] 徐万鑫,许宏丽. 改进的 ICP 算法在点云配准中的应用

[C]//2012 年第 14 届中国系统仿真技术及其应用学术年会. 北京:出版地不详,2012:205-208.

[7] CHEN Chao,IOANNIS S. Semi-automatic range to range registration;a feature-based method[C]//International conference on 3-D digital imaging and modeling. Ottawa, Ontario,Canada:IEEE,2005:254-261.

[8] 周春艳,李勇,邹峥嵘. 三维点云 ICP 算法改进研究[J]. 计算机技术与发展,2011,21(8):75-77.

[9] 陈阳. 三维点云数据配准方法研究[D]. 天津:天津大学,2014.

[10] 贾云得,刘万春,裴明涛,等. 一种保持纹理的网面简化算法[J]. 中国图象图形学报,2001,6(7):613-617.

[11] 王艳艳,罗晓锋. 基于三维网格模型数据在 Matlab 中的输入与处理[J]. 软件导刊,2012,11(9):118-120.

[12] 周元莉. 边界特征保持的机械 CAD 模型简化研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

[13] SHAMIR A. A formulation of boundary mesh segmentation [C]//Proceedings of the second international symposium on 3D data processing,visualization,and transmission. Thessaloniki,Greece:IEEE,2004:82-89.

[14] 罗意. 三维重建过程中配准算法的研究[D]. 赣州:江西理工大学,2016.

[15] 王勇,马立元,王忠强. 四元数法在计算机图形学中的应用[J]. 军械工程学院学报,2001,13(2):48-51.

[16] 张梅,文静华,张祖勋,等. 基于欧氏距离测度的激光点云配准[J]. 测绘科学,2010,35(3):5-8.