

基于法向量和面状指数特征的文物点云棱界配准方法

杨鹏程 杨朝 孟杰 肖渊 崔嘉宝

Aligning method for point cloud prism boundaries of cultural relics based on normal vector and faceted index features

YANG Peng-cheng, YANG Zhao, MENG Jie, XIAO Yuan, CUI Jia-bao

引用本文:

杨鹏程, 杨朝, 孟杰, 肖渊, 崔嘉宝. 基于法向量和面状指数特征的文物点云棱界配准方法[J]. *中国光学*, 2023, 16(3): 654–662. doi: 10.37188/CO.2022–0156

YANG Peng-cheng, YANG Zhao, MENG Jie, XIAO Yuan, CUI Jia-bao. Aligning method for point cloud prism boundaries of cultural relics based on normal vector and faceted index features[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 654–662. doi: 10.37188/CO.2022–0156

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光扫描匹配方法研究综述

A survey of laser scan matching methods

中国光学 (中英文). 2018, 11(6): 914 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0914>

基于改进的局部表面凸性算法三维点云分割

Improved local convexity algorithm of segmentation for 3D point cloud

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 348 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0348>

采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

基于改进的加速鲁棒特征的目标识别

Object detection based on improved speeded-up robust features

中国光学 (中英文). 2017, 10(6): 719 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0719>

表面等离子体平面金属透镜及其应用

Planar plasmonic lenses and their applications

中国光学 (中英文). 2017, 10(2): 149 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0149>

基于改进HOG特征提取的车型识别算法

Vehicle type recognition algorithm based on improved HOG feature

中国光学 (中英文). 2018, 11(2): 174 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0174>

文章编号 2097-1842(2023)03-0654-09

基于法向量和面状指数特征的文物点云棱界配准方法

杨鹏程^{1*}, 杨朝¹, 孟杰¹, 肖渊¹, 崔嘉宝^{2,3}

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西西安 710048;

2. 北京大学考古文博学院, 北京 100871;

3. 山西大学云冈学研究院, 山西太原 030006)

摘要: 三维重建是文物信息保护常用的方法, 其主要通过点云配准技术重组文物空间的点云信息, 配准精度对文物复原有重要影响。针对文物表面复杂点云纹理特征配准存在精度低、鲁棒性差的问题, 本文提出一种基于法向量夹角和面状指数特征的局域点云配准方法。首先, 根据点云平面特性设定法向量夹角和协方差矩阵阈值, 提取同时满足这两个特征的特征点; 其次, 采用 K 近邻搜索方法提取点云局域特征点集, 通过刚性变换使两组点云质心位置重合, 完成粗配准; 最终, 在两点云粗配准的基础上, 根据迭代最近点 ICP 进行精配准。与传统 ICP 方法进行对比分析, 结果显示本文方法的点云配准误差下降了 3%, 匹配耗时降低了 50%, 有效地提高了配准精度和效率, 增强了点云配准的鲁棒性。

关键词: 点云配准; 法向量夹角; 协方差矩阵; 平面特性; 局域特征信息

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0156

Aligning method for point cloud prism boundaries of cultural relics based on normal vector and faceted index features

YANG Peng-cheng^{1*}, YANG Zhao¹, MENG Jie¹, XIAO Yuan¹, CUI Jia-bao^{2,3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Yungangology Institute, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: yangpengcheng@xpu.edu.cn

Abstract: Three-dimensional reconstruction is a common method for cultural relics information conservation, mainly through point cloud alignment technology to reorganize the spatial point cloud information of cultural relics, and its alignment accuracy has an important impact on cultural relics recovery. To address the problems of low accuracy and poor robustness in the alignment of complex point cloud texture features on the surface of cultural relics, this paper proposes a local point cloud alignment method based on normal vector angle and faceted index features. Firstly, the normal vector angle and covariance matrix thresholds are set according to the point cloud planar characteristics, and the point cloud feature points satisfying both features

收稿日期: 2022-07-09; 修订日期: 2022-09-06

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划——面上项目 (No. 2022JM-219)

Supported by Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2022JM-219)

are extracted; secondly, the point cloud local feature point set is extracted by the K-nearest neighbor search method, and the two sets of point cloud center-of-mass positions are overlapped by rigid transformation for coarse alignment; finally, the nearest points are iterated based on ICP for fine alignment. By comparing with the traditional ICP, the point cloud alignment error of the proposed method reduces by 3% and the matching time reduces by 50%, which effectively improves the accuracy and efficiency of alignment and enhances the robustness of point cloud alignment.

Key words: point cloud alignment; normal vector pinch angles; covariance matrix; planar properties; local feature information

1 引言

文物作为一种不可再生的物质文化遗产,有着丰富的历史价值、科学价值、艺术价值,文物反映了古代社会的真实面貌,对于正确认识人类古代文明,指导现在的生产活动、科学研究等都有重要价值。但随着时间的流逝和环境变化,许多文物、古建筑都难免遭受不同程度的损坏,文物的不可再生性使得最大限度地保留文物自身所蕴含的信息十分重要,而通过采集文物的三维点云数据对其进行精确建模能够帮我们实现这一目的,这也成为文物数字化保护^[1]、展示的重要技术手段。

在数据采集过程中,常用到结构光或激光雷达提取模型表面点云数据,其数据的完整性和精度直接影响后续点云的配准及重建效果。目前,国内外已开展了许多关于三维点云采集的研究工作。如 Altuntas^[2] 利用激光雷达与其他相关传感器集成的多波束扫描仪进行移动三维测量,提高了点云数据的采集范围和点密度。史艳侠^[3] 等通过对结构光测量系统模型的分析,利用图像提取点云的站位信息,但图像则减少了更多的空间点云位置数据信息的获取。Medda^[4] 等提出一种多相机的自动点云采集系统,利用多个深度传感器采集点云实现室内环境自动扫描。Toschi^[5] 等利用机载联动 LiDAR 和摄影测量点云,通过体素结构过滤只选择用于配准细化的最佳点。上述方法虽针对特定情况取得了不错的结果,但它们受噪点影响较大,且点云细化过程复杂。

对于过大的实物模型来说,由于设备有效测量距离有限不能一次性完整采集所有点云数据,因此需要局部采集点云,再通过配准完成后续工作。点云配准最常用的方法是迭代最近点^[6](Iter-

ative Closest Point, ICP)。该方法通过对两组点云集进行初步匹配,在其配准空间位置的基础上找出两组点云集间的对应关系,从而进一步提高配准精度。

目前,国内外已有许多对点云配准的改进工作。如林森^[7] 等通过改进的法向量夹角、点密度和曲率值,获取多尺度矩阵描述符进而完成精确配准,但获取点云特征描述子的参数较多、计算量大,耗时较长。Cedrique^[8] 等提取点云平面结构,利用 4PCS 技术估计对齐平面结构的变换,从而减少了数据规模和工作量,但对于复杂模型的配准效果较差。Sun^[9] 等利用深度图像获得点云稀疏特征信息,通过稀疏表示获得配准结果,提高了点云配准精度。Elizeu^[10] 等提出通过合并 SIFT 3D 算法和 PFH 算法寻找变换参数初始近似的非迭代方案,但是对于复杂的文物点云,该计算特征序列难以精准描述点的特征。Kuçak^[11] 等根据模型关键点之间的角度和距离表示的几何关系,对关键点进行匹配,提高了点云配准精度以及点云重建效果。Bauer^[12] 等利用特定区域的投影(图像数据)和虚拟结构(点数据)的多组点云完成配准。该方法具有较高的配准精度和稳定性,但对于区域重叠部分的文物点云信息,投影图像将会导致文物的空间纹理特征信息减少,降低文物点云配准效率。

本文针对文物表面复杂点云纹理特征配准中存在的配准精度低、鲁棒性差的问题,提出一种基于法向量夹角和面状指数特征的局域点云配准方法。该方法用点云协方差矩阵平面性特征值来表示三维点云曲面面状指数,结合点云法向量夹角特征,通过阈值筛选出点云特征点进行配准。该方法提高了文物表面纹理特征点云信息的配准精度,验证了此方法的可行性和鲁棒性。

2 点云特征点提取

在描述三维点云特征信息时,最常用到的是法向量^[13]和曲率^[14]。由于物体棱角上点云的法向量夹角以及曲率值相比面上变化较大,所以将棱角处点云作为特征点。但单一的局部特征对点云特征描述效果较差,法向量夹角或曲率阈值过大或过小都不能有效剔除模型表面上的点,因此本文结合点云法向量夹角和邻域内点集协方差矩阵平面性特征值来提取点云特征点。

先分别提取满足点云法向量夹角阈值和邻域内协方差矩阵平面性特征阈值的点的合集;然后筛选出同时满足这两条的点作为物体的特征点,最后将特征点集进行迭代匹配,完成点云配准。

2.1 点云法向量特征描述子的提取

点云法向量是一个带有方向和大小的矢量,且不同形状表面的法向量方向不同,如图 1 所示,本文通过点云与邻域点间法向量的夹角来判断其是否为特征点。

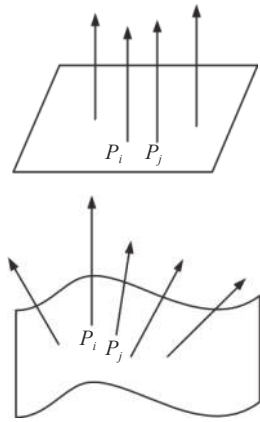


图 1 不同表面形状的法向量

Fig. 1 Normal vectors of different surface shapes

在空间坐标系下,假设点云数据集 $\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$ 中的某一点为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$,对该点进行 k-d 树邻近搜索并使用最小二乘拟合局部平面^[15],得到平面方程:

$$ax + by + c = d \quad (1)$$

此拟合平面上其他点的矩阵形式可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

则该非齐次方程的最小值即为平面在 P_i 处的法向量。

同样,对采集的点云数据集 $\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$ 进行遍历操作,设点 $P(x, y, z)$ 为坐标原点,选择定值 r 为半径进行 k-d 树邻近搜索,确定筛选出的 $n(n \geq 6)$ 个相关点云后返回其位置指针所指向的法向量值,通过余弦定理得到法向量夹角,其公式如式 (3) 所示,其中, $i = 1, 2, \dots, n$, $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 是除 P_i 外的邻域点云。

$$\theta_i = \arccos \frac{x_i \cdot x + y_i \cdot y + z_i \cdot z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \quad (3)$$

如图 1 所示,对于平面而言,法向量之间夹角为 0 互不影响,所以不做考虑。但由于曲面存在,点云数据集的法向量发散且各法向量间存在一个角度(范围在 0°至 90°),为区分点云曲面与棱位置处的点集,本文选取夹角 $\delta = 60^\circ$ 来提取点云法向量变化较大的点集,即将点云边界棱角处的点集作为特征点。如果求得的各法向量夹角值 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 都大于 δ ,则认为该点为点云的特征点,用式 (4) 表示为:

$$\delta \geq \min \theta_i \quad (4)$$

但由于模型存在曲面,其局部表面上的点也可能满足此条件,因此单一的法向量夹角特征不足以充分描述点云的特征信息。

2.2 基于平面性点云协方差矩阵特征描述子的提取

协方差矩阵描述子^[16]是一种利用局部邻域特征构建的描述子,可以充分反映邻域点集的局部信息,进而得到该点的特征信息,即用点云协方差矩阵平面性特征值来表示三维点云曲面面状指数。

此方法遍历点云数据集中的每一点,通过 k-d 树邻近搜索,找到距目标点 P 最近的 n 个邻近点云数据,构建局部邻域样本点集,质心点计算公式如式 (5) 所示:

$$\bar{x} = \frac{\iint_D x F d\sigma}{\iint_D F d\sigma} \quad \bar{y} = \frac{\iint_D y F d\sigma}{\iint_D F d\sigma} \quad \bar{z} = \frac{\iint_D z F d\sigma}{\iint_D F d\sigma} \quad (5)$$

其中, D 表示样本邻域点云区域, $F(x, y, z(x, y))$ 为

点云密度公式。

接着, 对样本邻域集点云数据进行去质心化处理, 以构建协方差矩阵描述子, 该操作关键在于特征向量的选取, 应尽可能选取鲁棒性好, 代表性强的元素构建特征向量。通过协方差度量两个点云线性相关性程度, 协方差的计算公式如下:

$$\text{COV}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_i - \bar{X}) \cdot (\bar{Y}_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (6)$$

在统计学与概率论中, 协方差矩阵的每个元素是各个向量元素之间的协方差。由于采集到的点云数据集是一个 $n \times 3$ 的数组形式, 协方差矩阵计算的是不同维度之间的协方差, 因此各维度点云数据可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \mathbf{Y} &= (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ \mathbf{Z} &= (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) \end{aligned} \quad (7)$$

则 n 维随机变量 X, Y, Z 的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{C}_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} \text{cov}(X, X) & \text{cov}(X, Y) & \text{cov}(X, Z) \\ \text{cov}(Y, X) & \text{cov}(Y, Y) & \text{cov}(Y, Z) \\ \text{cov}(Z, X) & \text{cov}(Z, Y) & \text{cov}(Z, Z) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中每个元素值都可以利用上面计算协方差的公式进行计算。

SVD(奇异值分解)^[17] 可以将一个比较复杂的矩阵通过更小更简单的几个子矩阵相乘来表示, 这些子矩阵就是矩阵的重要特性。奇异值分解适用于任意的矩阵表达式为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (9)$$

矩阵形式为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (10)$$

其中, \mathbf{A} 是一个 $m \times n$ 的矩阵, \mathbf{U}, \mathbf{V} 分别是一个 $m \times m$ 和 $n \times n$ 的正交矩阵, $\mathbf{\Sigma}$ 是 $m \times n$ 的对角矩阵, 其对角线上的元素是矩阵的奇异值, 即点云的特征值, 且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$ 。之后根据 SVD 特征向量平面特性公式:

$$Q_{\lambda} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad (11)$$

得到点云数据集中每一点的特征值集合 $\{Q_1,$

$Q_2, Q_3, \dots, Q_n\}$, 用以表示三维点云数据面状情况指数。取其平均值 \bar{Q} 为临界点, 将所有点集与其进行比较, 如果 $Q_{\lambda} \geq \bar{Q}$, 则该点表示三维点云模型平面上的点集, 反之, 若 $Q_{\lambda} \leq \bar{Q}$, 则表示该点是点云模型边界或者棱上的点集, 以此筛选的点云数据特征值作为点云相关特征点提取出来。

3 点云配准

点云配准本质上是一种坐标变换, 将两组不同坐标系下有公共重叠部分的点云经过平移、旋转等刚性变换匹配在同一个坐标系内的过程^[18]。其流程如图 2 所示, 首先, 对采集的点云数据进行特征点提取, 其次, 使用奇异值分解法计算变换矩阵 (\mathbf{R}, \mathbf{t}) , 优化收敛函数, 最后, 使目标函数 $E(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ 最小, 循环迭代从而获得最优的配准效果。

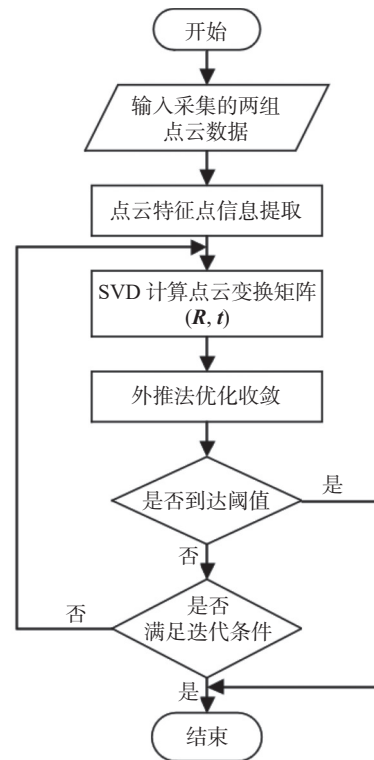


图 2 点云配准方法流程图

Fig. 2 Flow chart of point cloud alignment method

为减小全局点云在配准过程中的误差影响, 本实验采用局部点云配准方法。近似取两组点云上相同位置的某一点, 通过 k-d 树半径 $(r=60)$ 邻近搜索提取该区域特定点集数作为局域点云配准样本。计算两组点云的质心 $P(X_0, Y_0, Z_0)$, 通过刚性变换^[19] 绕坐标轴将不同坐标系下的两组点

云质心点位置经过旋转和平移进行初始配准, 点云绕 x 轴的刚性变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ y_0 - y_0\cos\theta + z_0\sin\theta \\ z_0 - y_0\sin\theta - z_0\cos\theta \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中, (x, y, z) 是变化前的点云坐标, (x', y', z') 表示刚性变换后的点云坐标, θ 表示转动角度。点云精配准是在粗配准的基础上通过计算欧式距离进行迭代配准。

两组局域点云精配准后, 会得到一个 4×4 的局部点云配准的变换矩阵 T , T 的形式如下:

$$T = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中, $\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}$ 为点云旋转矩阵, $(t_x \ t_y \ t_z)$ 为点云平移矩阵。将此矩阵应用到原始点云数集中, 实现完整点云精配准。

4 实验分析及验证

本实验硬件设备使用 Handyscan300 手持式三维扫描仪采集点云数据, 其光源为 3 条交叉线性矩阵激光扫描仪, 测量速率为 2.05×10^5 次/秒, 测量精度最高至 0.040 mm, 分辨率为 0.100 mm, 基准距为 300 mm, 景深 250 mm, 属于 II 级激光, 在人眼安全范围内, 能够快速建立可视化模型。反光标定贴纸可以作为拼接和定位数据的依据, 通过标定点信息定位续接完成数据再次采集, 并且标定点处文物扫描出的数据更加准确、精度较高。反光标定贴纸主要用于古建筑、文物、著名造像等器物中, 通过高密度和高精确度的测量, 对文物数据进行精确反馈并及时准确地提供修复数据。然而对于一些不方便粘贴标定或者易损坏的文物, 则需要完全非接触的测量, 如光栅投影^[20], 摄影测量技术^[21]等。

线性矩阵激光是通过扫描仪发射 3 条线性阵列激光, 激光照射到待测目标物体上经反射获得扫描截面的数据, 实测图如图 3 所示。利用

MATLAB2021a 对复杂纹理特征信息的兵马俑模型点云数据进行测试, 通过与传统的 ICP 方法做对比, 验证此方法的效率和可行性。



图 3 模型实测图

Fig. 3 Model measurement diagram

在采集点云数据过程中, 以正对模型位置为基准, 45° 为单元, 通过刻度转盘旋转分 8 次完成模型完整点云数据的采样。本实验分别以 0° 和 45° 方向采集兵马俑模型点云数据, 点云数目分别为 74320 和 66778, 采集到的原始点云数据如图 4 所示。

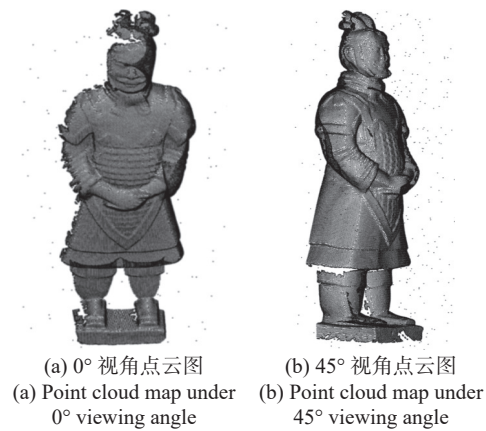


图 4 原始点云图

Fig. 4 Primitive point cloud diagrams

接着, 对 0° 和 45° 这两组采集的点云进行配准实验。对采集到的原始点云数据进行预处理, 去除点云离散点, 分别提取文物法向量夹角和点云面状指数特征点如图 5、图 6 (彩图见期刊电子版) 所示。其中图 6(a) 为点云面状特征颜色渲染图, 位于面上的点云特征值数值接近于 1, 颜色趋于黄色; 相反, 位于边界或棱上的点云特征值接近于 0, 颜色趋近蓝色。由此图可以区分协方差矩阵特征点云。通过设定协方差矩阵特征均值 \bar{Q} , 取协方差矩阵特征值集合 $\{Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n\}$ 中大于 \bar{Q} 的点作为特征点。

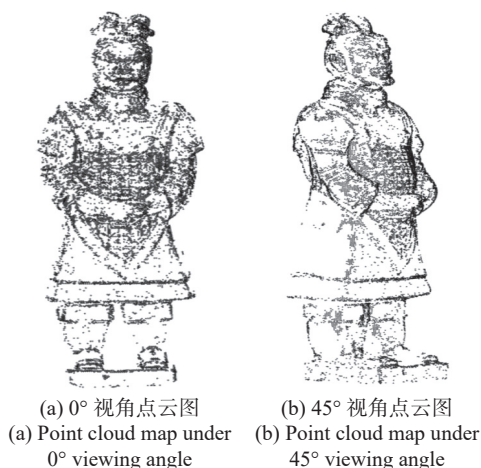
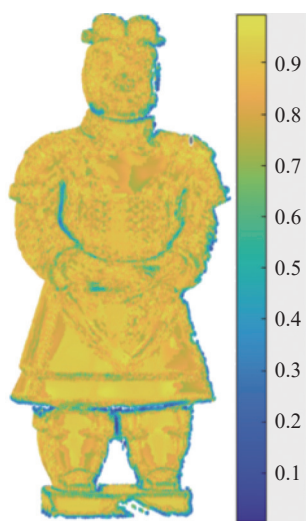


图 5 点云法向量特征图

Fig. 5 Normal vector feature plots of point cloud



(a) 点云面状颜色渲染图

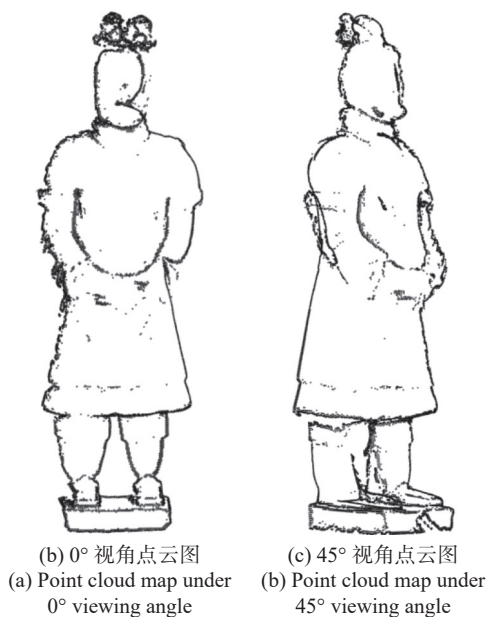


图 6 点云面状指数特征图

Fig. 6 Point cloud-like exponential characteristics

结合法向量夹角和点云面状指数特征, 提取的点云特征如图 7 所示。其降低了点云配准过程中复杂的计算量, 同时减少了多余点集对点云配准结果的影响, 提高了配准效率。最终的局部特征点云配准结果如图 8(彩图见期刊电子版) 所示, 点云与目标点云点集分别用绿色和紫色表示, 配准后会得到一个 4×4 的局部点云配准的变换矩阵 T , 将此矩阵应用到原始点云数集中, 实现完整点云精配准。

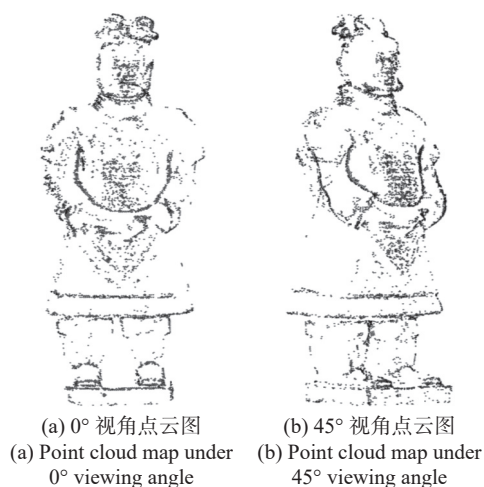


图 7 点云特征图

Fig. 7 Point cloud feature diagrams

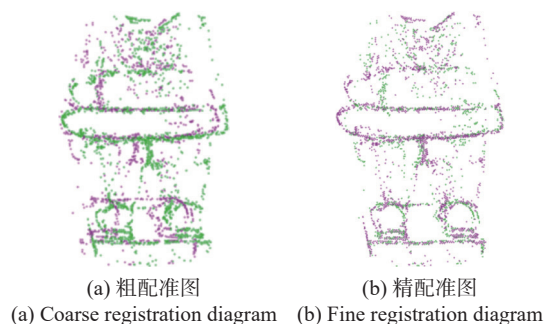


图 8 特征点云局部配准图

Fig. 8 Feature point cloud local registration diagram

为了验证点云配准结果的精度, 用绿色和紫色分别表示源点云与目标点云点集, 将其与传统的 ICP 方法进行对比, 对比结果如图 9(彩图见期刊电子版) 所示。图 9(a)、9(b) 为兵马俑点云配准正视图, 从红色框区域可看出改进后的点云模型身体边界、模型棱角处的点云配准图像重合度比传统方法的高。图 9(c)、9(d) 是从俯视角度观察, 可见, 红色框区域中改进后模型脚部以及底部平台处点云配准方法精度比传统方法的结果更准确。

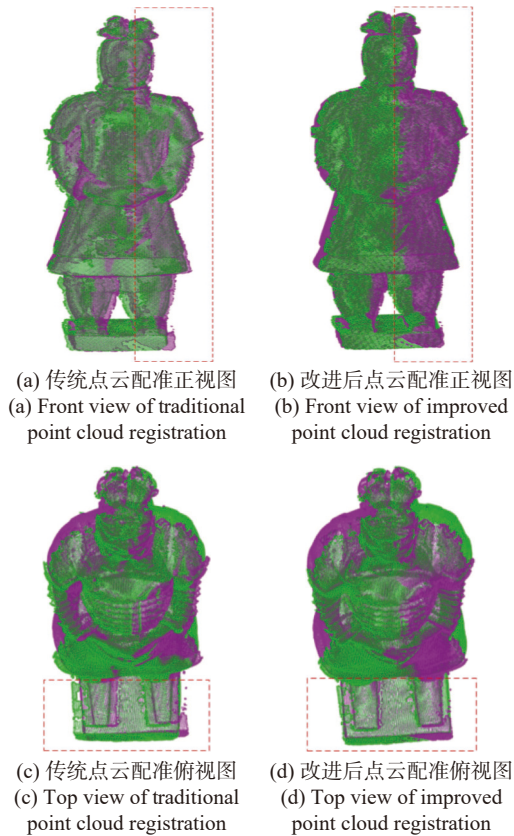


图 9 兵马俑点云配准对比图

Fig. 9 Comparison charts of point cloud registration for terracotta army

点云匹配精度以均方根误差作为评判标准,反映了测量数据偏离真实值的程度,其值越小表示测量精度越高。其均方根误差公式为:

$$RMSE(X, h) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h(x_i) - y_i)^2} \quad (14)$$

点云配准过程中各部分实验数据如表 1 所示,改进后点云特征点提取数目近似为原数据的 1/12,配准时间接近缩为原来 1/2,均方根误差

参考文献:

- [1] 肖宇强. 海外藏中国戏曲与民俗文物的“数字孪生”及数字化资源平台建设[J]. *文化遗产*, 2022(1): 89-96. XIAO Y Q. Digital twin of Chinese opera and folklore relics in overseas collections and the construction of digital resource Platform[J]. *Cultural Heritage*, 2022(1): 89-96. (in Chinese)
- [2] ALTUNTAS C. Point cloud acquisition techniques by using scanning LiDAR for 3D modelling and mobile measurement[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, XLIII-B2-2022: 967-972.
- [3] 史艳侠, 娄小平, 李伟仙. 线结构光点云粗拼接方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(6): 12-16. SHI Y X, LOU X P, LI W X. Coarse stitching of point structured cloud of line structured light research on unconstrained method of surface measurement[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(6): 12-16. (in Chinese)

RMSE 从 7.88% 降至 4.73%, 配准误差下降了 3%。实验结果表明, 本文方法相比传统点云配准方法在效率、精度方面都大有提高。

表 1 兵马俑点云配准过程实验数据分析

Tab. 1 Experimental data analysis of terracotta army point cloud registration process

方法	点云数目	特征点数	配准时间/s	RMSE/mm
传统ICP	74 320/	72 322/66 440	11.73	7.88
本文方法	66 778	6 083/5 723	6.22	4.73

5 结 论

本文针对文物表面复杂点云纹理特征配准中存在的配准精度低、鲁棒性差问题, 提出一种基于法向量夹角和面状指数特征的局域点云配准方法。首先设定法向量夹角和协方差矩阵平面特性阈值, 筛选出点云的特征点, 提取同时满足这两个特征的点云关键点; 其次, 根据 K 近邻搜索提取点云局域特征信息, 通过刚性变换使两组点云质心位置重合, 进行粗配准; 在两点云粗配准位置基础上根据 ICP 迭代最近点进行精配准。实验表明, 参与配准的点云特征点数据量减少了 90%, 配准时间提高了 50%, 点云配准均方根误差 RMSE 下降 3% 左右。此方法有效降低了文物数据信息量大且纹理特征复杂的点云数据对配准误差的影响, 增强了点云配准的鲁棒性。

但在实际测量应用中, 标定贴纸的使用仍具有一定的局限性, 通过用文物外形上的自然特征点或特征区域代替标定贴纸, 这将是后续研究的方向。

- [4] MEDDA D, ANOFFO Y M, PERRA C, *et al.*. Automated point cloud acquisition system using multiple RGB-D cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11353: 1135315.
- [5] TOSCHI I, FARELLA E M, WELPONER M, *et al.*. Quality-based registration refinement of airborne LiDAR and photogrammetric point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 172: 160-170.
- [6] 刘跃生, 陈新度, 吴磊, 等. 混合稀疏迭代最近点配准[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(9): 2255-2267.
LIU Y SH, CHEN X D, WU L, *et al.*. Sparse mixture iterative closest point registration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(9): 2255-2267. (in Chinese)
- [7] 林森, 张强. 应用邻域点信息描述与匹配的点云配准[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(8): 984-997.
LIN S, ZHANG Q. Point cloud registration using neighborhood point information description and matching[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(8): 984-997. (in Chinese)
- [8] FOTSING C, NZIENGAM N, BOBDA C. Large common planesets-4-points congruent sets for point cloud registration[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(11): 647.
- [9] SUN L, MANABE Y, YATA N. [Paper] double sparse representation for point cloud registration[J]. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2019, 7(3): 148-158.
- [10] JUNIOR E M O, SANTOS D R, MIOLA G A R. A new variant of the ICP algorithm for pairwise 3D point cloud registration[J]. *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 2022, 85(1): 71-88.
- [11] KUÇAK R A, EROL S, EROL B. An experimental study of a new keypoint matching algorithm for automatic point cloud registration[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(4): 204.
- [12] BAUER P, HECKLER L, WORACK M, *et al.*. Registration strategy of point clouds based on region-specific projections and virtual structures for robot-based inspection systems[J]. *Measurement*, 2021, 185: 109963.
- [13] SUN W X, WANG J, JIN F X, *et al.*. Datum feature extraction and deformation analysis method based on normal vector of point cloud[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-3: 1601-1606.
- [14] FOORGINEJAD A, KHALILI K. Umbrella curvature: a new curvature estimation method for point clouds[J]. *Procedia Technology*, 2014, 12: 347-352.
- [15] 宁浩, 董秀军, 刘谦, 等. 利用点云法向量实现岩体结构面识别[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1-13 [2022-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.tn.20211028.1541.027.html>.
NING H, DONG X J, LIU Q, *et al.*. Using point cloud normal vector to realize rock mass structural plane recognition[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-13 [2022-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.tn.20211028.1541.027.html>. (in Chinese)
- [16] 张溪溪, 纪小刚, 胡海涛, 等. 微型复杂曲面零件散乱点云特征点提取[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(5): 1-5,10.
ZHANG X X, JI X G, HU H T, *et al.*. Feature point extraction of scattered point cloud for complex micro-surface parts[J]. *Machine Design & Research*, 2019, 35(5): 1-5,10. (in Chinese)
- [17] 赵夫群, 耿国华. 基于图像特征和奇异值分解的点云配准算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101101.
ZHAO F Q, GENG G H. Point cloud registration algorithm based on image feature and singular value decomposition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101101. (in Chinese)
- [18] 谭国威, 伍吉仓. 基于FPFH特征的三维点云配准方法研究[J]. *工程勘察*, 2022, 50(4): 52-56.
TAN G W, WU J C. Research on 3D point cloud registration based on FPFH features[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2022, 50(4): 52-56. (in Chinese)
- [19] 秦红星, 刘镇涛, 谭博元. 深度学习刚性点云配准前沿进展[J]. *中国图象图形学报*, 2022, 27(2): 329-348.
QIN H X, LIU ZH T, TAN B Y. Review on deep learning rigid point cloud registration[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2022, 27(2): 329-348. (in Chinese)
- [20] ZHANG R ZH, LIU K. Research introduction of 3D measurement technology based on grating projection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11887: 1188722.
- [21] MURTIYOSO A, GRUSSENMEYER P. Automatic point cloud noise masking in close range photogrammetry for buildings using AI-based semantic labelling[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, XLVI-2/W1-2022: 389-393.

作者简介:



杨鹏程(1985—),男,副教授,博士,2008年于长沙理工大学获得学士学位,2013年于西安交通大学获得博士学位,主要从事激光干涉测量、三维数据精确建模、数字图像处理的研究。Email: yangpengcheng@xpu.edu.cn



杨朝(1996—),男,硕士研究生,2019年于西安工程大学获得学士学位,主要研究方向:全息幻影成像,三维数据精确建模。Email: muyi_meng2021@163.com

《中国光学(中英文)》征稿启事

《中国光学(中英文)》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行人, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(Ei)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版:《中国光学(中英文)》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话:0431-86176852; 0431-84627061

传 真:0431-84627061

编辑部地址:长春市东南湖大路 3888 号(130033)