

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.05.028

马天娇, 叶方坚, 韩广良, 等. 足部模型点云配准方法研究 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (05): 75-78.

足部模型点云配准方法研究

马天娇¹, 叶方坚², 韩广良¹, 刘培勋^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 公安部物证鉴定中心痕迹科学与技术重点实验室, 北京 100038)

摘要: 由于人体足部呈长条状且不规则的几何形状, 使得用三维扫描设备进行点云数据采集时, 会出现点云数据重叠度较低的情况, 配准难度较高。针对人体足部的外表结构不规则几何特性, 提出了一种先粗配准再细配准方法对足部模型点云进行配准。先对采集到的足部模型点云数据进行去噪、滤波等预处理, 再在足部模型下设置一立方体底座, 利用立方体底座法向量规则均匀的特性来辅助粗配准工作; 再采用点云分割方法去掉立方体底座, 最后利用ICP最近点迭代对足部模型进行细匹配, 从而实现对足部模型点云的配准。实验结果表明: 提出的配准方法与传统的ICP方法相比, 不但可以实现对足部模型点云的配准, 且在配准速度上提高了54%, 配准精度上提高了42%。

关键词: 足部模型点云配准; ABB包围盒; 最近点迭代

中图分类号: TP314.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2020)05-0075-04

Research on Point Cloud Registration Method of Foot Model

MA Tianjiao¹, YE Fangjian², HAN Guangliang¹, LIU Peixun^{1*}

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Key Laboratory of Trace Science and Technology, Institute of Forensic Science of China, Beijing 100038, China)

Abstract: Because the foot of human body is long and irregular geometry, when using 3D scanning equipment to collect point cloud data, there will be low overlap of point cloud data, and registration is difficult. According to the irregular geometry of human foot, a method of rough registration and fine registration was proposed to register the point cloud of foot model. Firstly, preprocess the collected point cloud data of foot model, such as preprocess and filtering, then set a cube base under the foot model, use the regular and uniform characteristics of the normal vector of cube base to assist the coarse registration; then use the point cloud segmentation method to remove the cube base, and finally use the ICP nearest point iteration to fine match the foot model, so as to realize the fine matching of the foot model Point cloud registration. The experimental results show that the proposed registration method can not only achieve the registration of point cloud of foot model, but also improve the registration speed by 54% and the registration accuracy by 42% compared with the traditional ICP method.

Key words: foot model point cloud registration; ABB bounding box; iterative closest points

0 引言

痕迹检验技术是公安部在进行刑事案件及其他各类案件中应用最广泛的一门技术。足部点云配准与三维重建是刑事科学技术研究中的一重要研究课题, 由于受设备传感器的限制, 三维扫描测量设备在进行扫描物体时每次只能扫到被测物体的部分点云数据, 若想获得被测物体的全部点云数据, 需对被测物体的不同视角进行多次扫描, 并对每个视角的点云数据进行融合拼接。然而每个视角下的点云都具有独立的坐标系, 无法实现直接对其拼接。因此需要对所有视角下获取到的点云进行坐标变换统一到同一坐标系下, 对相邻视角的点云数据进行配准融合, 拼接出被测物体完整的点云数据。

目前国内外研究学者对点云配准都进行了深入的研究, 也取得了丰硕的研究成果。常见的点云配准拼接方法主要分为两大类。

一类是无辅助的自动拼接, 其中以迭代最近点法(ICP)及其改进算法^[1-4]和基于几何特征匹配法^[5]为代表的算法目前应用最为广泛。如Mavridis^[6]提出了一种基于混合优化系统的稀疏ICP算法, 来改善配准算法的速度和精度问题;

Dus^[7]提出了尺度ICP算法, 解决了含尺度因素的点云配准问题; 赵夫群^[8]提出了基于旋转角约束来解决由于旋转角度过大而引起的配准效果不佳的问题, 然而用迭代最近法(ICP)进行点云配准时往往容易陷入局部最优解, 且该方法要求待配准的两个点云位置相差不大, 因此直接采用迭代最近法(ICP)进行点云配准往往无法达到理想的配准效果。用特征点匹配就是通过分析被测物体的局部几何特征来寻找特征点并实现匹配。如Liao^[9]提出了一种基于局部特征的配准方法, 通过计算两个点集的几何特征, 建立对应特征点对并计算其刚体变换矩阵来实现点云配准问题。但该算法特征点往往包含的几何信息较少, 因此稳定性有待提高。

另一类点云配准拼接方法就是人工辅助标志点配准方法^[10-11], 该方法常用于没有明显特征点的物体, 当传感器从不同视角无法对同一点获取的点云数据进行有效识别定位, 此时就需要人为在被测物体上添加标志点, 进行测量。

传统点云配准方法对于采集到的点云数据要求较高, 需满足待配准的两点云具有较高重叠度的条件, 否则就会导致配准不准确。由于人体足部特征信息较少, 且足部外表几何形状结构不规则, 当足部模型点云采集工作受三维测量设备

收稿日期: 2020-03-30

成像距离与角度的限制时,会导致从脚趾和脚跟方向采集到的点云数据与从足部侧面采集到的点云数据重叠度较低,从而给点云配准工作带来很大难度。本文针对这一难题提出了一种先粗配准再细配准的配准策略。首先采用具有规则几何形状的底座作辅助,并结合包围盒的配准方法对足部模型点云进行粗配准,然后再采用ICP最近点迭代算法进行足部模型点云精配准,最终实现足部模型完整点云的获取。实验结果证明,该方法不但可以得到足部模型的完整点云,且与传统的点云配准方法相比,大大减少了计算量,缩短了计算时间。

1 点云配准理论及方法

由于人体足部整体结构呈长条形,脚趾外表面呈不规则几何形状,使得三维扫描设备在对足部模型进行点云数据采集时,会出现从脚趾和脚跟方向采集到的点云数据与从足部侧面采集到的点云数据重叠度较低的情况,因此本文在对足部模型点云配准时,在足部模型下方增加一个具有规则几何形状的立方体底座,利用立方体底座法向量均匀规则的特性来辅助足部模型点云粗配准工作。具体配准方法是:在进行点云数据采集时,针对相邻的两片点云进行配准,先采用基于旋转角约束的AABB包围盒法对点云进行粗配准,待粗配准工作结束后,采用点云分割方法去掉足部模型下方立方体底座,最后进行足部模型点云细配准。

1.1 基于旋转约束的AABB包围盒粗配准

1.1.1 AABB包围盒

AABB包围盒是包含被测模型,且边平行于坐标轴的最小六面体。描述一个AABB包围盒仅需要6个参数,即沿3个坐标轴方向的最小坐标值和最大坐标值。如图1所示,ABCD-A'B'C'D'为包含源点云的包围盒,EFGH-E'F'G'H'为目标点云的包围盒,记 $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$ 和 $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$ 为源点云AABB包围盒沿3个坐标轴方向的最小坐标值和最大坐标值, $x'_{\min}, y'_{\min}, z'_{\min}$ 和 $x'_{\max}, y'_{\max}, z'_{\max}$ 为目标点云AABB包围盒沿3个坐标轴方向的最小值和最大值, C_p 为包围盒ABCD-A'B'C'D'的质心, C_q 为包围盒EFGH-E'F'G'H'的质心, p 为坐标原点O到 C_p 之间的向量, q 为坐标原点O到 C_q 之间的向量,根据源点云与目标点云包围盒质心可计算ABCD-A'B'C'D'到EFGH-E'F'G'H'刚体变换的初始旋转平移矩阵 $q_0=[R_0, t_0]^T$ 。

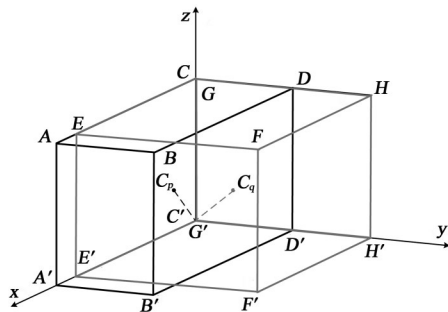


图1 包含源点云与目标点云的AABB包围盒

其中:

$$T_0 = [x_{C_q} - x_{C_p}, y_{C_q} - y_{C_p}, z_{C_q} - z_{C_p}] \quad (1)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x^2 & \theta(1 - \cos \theta)xy - (\sin \theta)z & (1 - \cos \theta)xz + (\sin \theta)y \\ (1 - \cos \theta)yx + (\sin \theta)z & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y^2 & (1 - \cos \theta)yz - (\sin \theta)x \\ (1 - \cos \theta)zx - (\sin \theta)y & (1 - \cos \theta)zy + (\sin \theta)x & \cos \theta + (1 - \cos \theta)z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = \arccos \frac{p \cdot q}{|p| |q|} \quad (3)$$

1.1.2 旋转约束

旋转约束是针对AABB包围盒进行刚性变换时设置的几何约束。其目的是给粗配准过程中的刚性变换加入收敛条件,当变换后满足旋转约束的收敛条件时,则粗配准工作完成。

假设P、Q为相邻的两组原始点云数据集。本文采用K-d tree的方法在两组点云数据集中的立方体底座上找到具有对应关系的点对,如图2所示,分别记为源点云p与目标点云q,记 $p_i=(x_i, y_i, z_i)$ 为源点云中的点, $q_i=(x_i, y_i, z_i)$ 为目标点云中的点, n_{is} 为 p_i 对应的法线, n_{it} 为 q_i 对应的法线,定义 n_{is} 与 n_{it} 之间的偏差为 θ :

$$\theta = \arccos \frac{n_{is} \cdot n_{it}}{\|n_{is}\| \|n_{it}\|} \quad (4)$$

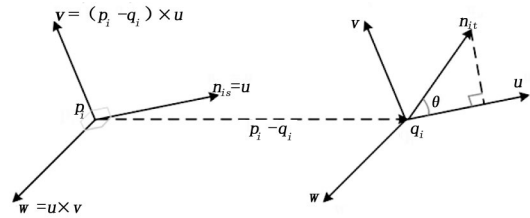


图2 源点云中的点与目标点云中点的法向量偏差

1.2 ICP最近点迭代

ICP (Iterative Closest Point) 最近点迭代法的本质基于最小二乘的最优配准法。其基本思想是:从源点云和目标点云中选择具有对应关系的点对,计算源点云到目标点云的刚体变换矩阵,将源点云刚体变换后的结果作为新的源点云,重复进行上述操作,使源点云越来越靠近目标点云,直到两组点云数据之间满足距离度量准则下的最优匹配。点云配准的目的是找到从源点云到目标点云的变换矩阵,使得误差E最小,记:

$$E(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - (Rp_i + T)\|^2 \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中: n 为源点云与目标点云中对应点数目; $p_i=(x_i, y_i, z_i)$,为代表源点云中的点; $q_i=(x_i, y_i, z_i)$,为目标点云中的点; $p_i \in P, q_i \in Q, p \subset P, q \subset Q$ 。

记源点云与目标点云的质心分别为:

$$C_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i, \quad C_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (6)$$

由源点云到目标点云的变换关系知:

$$C_q = RC_p + T \quad (7)$$

定义 $d_{qi}=q_i - C_q$, $d_{pi}=p_i - C_p$,则目标函数变为:

$$\begin{aligned} E(R, T) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - (Rp_i + T)\|^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|d_{qi} + C_q - [R(d_{pi} + C_p) + T]\|^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|d_{qi} - Rd_{pi}\|^2 = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{qi}^T d_{qi} + d_{pi}^T R^T R d_{pi} - 2d_{qi}^T R d_{pi}) = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{qi}^T d_{qi} + d_{pi}^T d_{pi} - 2d_{qi}^T R d_{pi}) \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知,第一项 $d_{qi}^T d_{qi}$ 与第二项 $d_{pi}^T d_{pi}$ 均与 R 无

关, 故求目标函数 $E(R, T)$ 最小值的问题可转化为求

$\sum_{i=1}^n d_{qi}^T R d_{pi}$ 最大值的问题。又:

$$\sum_{i=1}^n d_{qi}^T R d_{pi} = \sum_{i=1}^n \text{tr}(R d_{pi} d_{qi}^T) = \text{tr}(R \sum_{i=1}^n d_{pi} d_{qi}^T) \quad (9)$$

令 $H = \sum_{i=1}^n d_{pi} d_{qi}^T$, R^* 为 $\sum_{i=1}^n d_{pi} d_{qi}^T$ 的最优解, 则有:

$$\text{tr}(R^* H) \geq \text{tr}(RH) = \text{tr}(BR^* H) \quad (10)$$

对 H 进行奇异值分解: $H = U \Sigma V^T$, 可得最优解 $R^* = V U^T$, 其中需满足 H 为满秩, 且 $\det(R^*) = 1$ 的条件。从而可进一步得到最优解 T^* :

$$T^* = C_q - R C_p \quad (11)$$

1.3 点云配准方法

结合基于 $AABB$ 包围盒的粗配准和 ICP 细配准算法后, 足部模型点云配准实现步骤如下。

(1) 计算包含立方体底座在内的源点云与目标点云 $AABB$ 包围盒及其质心, 计算包围盒之间刚体变换初始变换矩阵 $q_0 = [R_0, t_0]^T$ 。

(2) 提取目标点云立方体底座左右两侧的点, 并定义其朝向左右两侧的法向量分别为 left $(-1, 0, 0)$, right $(1, 0, 0)$, 计算源点云初始刚体变换后朝向左右两侧的法向量与与 left $(-1, 0, 0)$, right $(1, 0, 0)$ 之间的夹角 θ , 并设定一个阈值 θ' 。若 $\theta > \theta'$, 则重复步骤 (1) 工作, 直至夹角小于设定阈值, 则足部模型点云粗配准工作结束。

(3) 采用点云分割方法去掉立方体底座, ICP 最近点迭代方法, 对待配准点云进行配准, 利用 SVD 奇异值分解方法, 计算源点云与目标点云之间的旋转平移矩阵: $q_s = [R_s, t_s]^T$ 。

计算均方根误差 RMS :

$$RMS = (\sum_{i=1}^n \|PR_s + T_s - Q\|_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

设定均方根误差阈值 ε , 若 $RMS < \varepsilon$, 则重复步骤 (3), 直至满足收敛条件 $RMS < \varepsilon$ 。

2 实验结果及误差分析与讨论

为验证本文算法的有效性, 本文使用旋转机构搭载结构光相机先后对鞋子和足部模型进行扫描来采集点云数据, 通过对两种模型配准结果进行评估来验证本文提出的算法的有效性。图3所示为依据本文点云配准方法对鞋子采集到的初始点云数据, 并进行预处理与感兴趣区域 (ROI) 提取的结果, 图4所示为提取特征后的法向量计算结果, 图5所示为采用本文点云配准方法, 得到的鞋子点云配准拼接结果。图6所示为

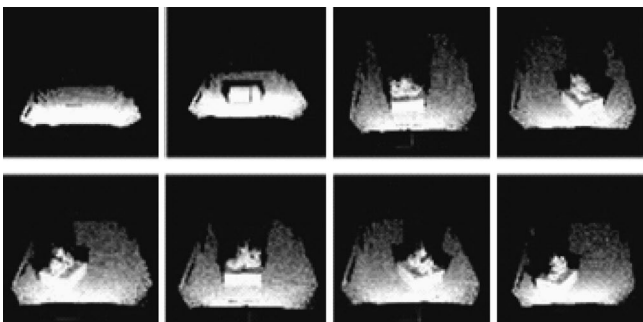


图3 鞋子点云预处理及ROI提取结果

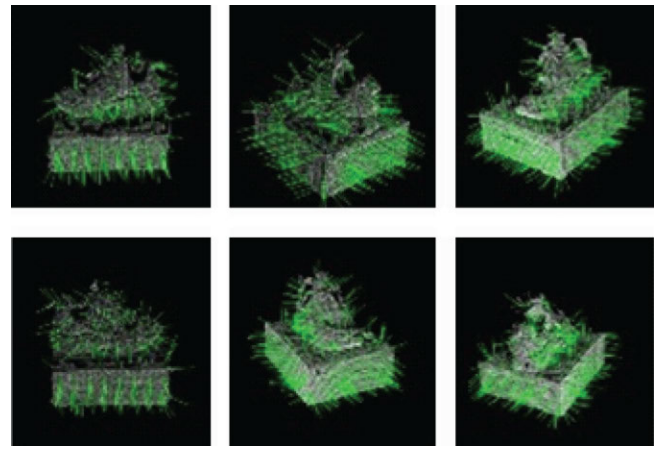


图4 鞋子点云法向量计算结果



图5 鞋子点云配准拼接结果 图6 足部模型点云配准拼接结果

采用本文点云配准方法对足部模型点云配准拼接后得到的结果。表1所示为传统ICP配准方法和本文方法围绕足部模型采集的6幅点云数据配准结果的平均统计值。

表1 配准结果

配准方法	迭代次数	配准误差/mm	配准耗时(平均)/s
ICP	34	7.81×10^{-2}	34.22
基于旋转角约束的 AABB包围盒粗配准	17	2.36×10^{-1}	6.53
本文配准方法	31	3.59×10^{-2}	13.17

从图5、图6可以看出, 本文对鞋子和足部模型点云有较好的配准效果。从表1中可以看出, 与传统ICP配准方法相比, 本文算法在配准精度和配准速度上均有提高: 在配准精度上提高了54%, 在配准速度上提高了42%, 由此可见本文算法对足部模型点云配准的有效性。

3 结束语

足部点云配准是公安痕迹科学研究重点研究内容之一, 其配准结果的准确度会直接影响后续模型重建的精度。本文提出了一种先用基于包围盒进行粗配准再用ICP进行细配准的配准方法, 并在鞋子和足部模型点云数据上进行了配准实验。与传统的ICP点云配准算法相比, 本文的算法在配准速度和精度均有较大的改善, 其中对鞋子点云的配准速度提高了54%, 精度提高了42%, 实现了鞋子和足部模型点云数据快速、准确地配准。

参考文献:

- [1] Paul J. Besl, Neil D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1992, 14(3): 239-256.
- [2] 王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数

- 据配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9):2068-2077.
- [3] Li W, Song P. A modified ICP algorithm based on dynamic adjustment factor for registration of point cloud and CAD model[J]. Pattern Recognition Letters, 2015, 65(11):88-94.
- [4] 伍梦琦, 李中伟, 钟凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 35(02):237-244.
- [5] 潘忠文, 廉永正, 曾耀祥, 等. 运载火箭振动环境试验条件解析[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(06):34-37.
- [6] Mavridis, Pavlos, Andreadis, Anthousis, Papaioannou, Georgios. Efficient Sparse ICP[J]. Computer Aided Geometric Design, 2015(03):16-26.
- [7] Du Shaoyi, Liu Juan, Zhang Chunjia, et al. Probability iterative closest point algorithm for m-D point set registration with noise[J]. Neurocomputing, 2015, 157:187-198.
- [8] 赵夫群, 周明全. 颅骨点云模型的优化配准[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7):1927-1933.
- [9] Ge Y, Wang B, Nie J, et al. A point cloud registration method

- combining enhanced particle swarm optimization and iterative closest point method[C]. Proceeding of CCDC, 2016.
- [10] Cheng L, Tong L, Li M, et al. Semi-automatic registration of airborne and terrestrial laser scanning data using building corner matching with boundaries as reliability check[J]. Remote Sens, 2013, 5(12):6260-6283.
- [11] Jiang J, Cheng J, Chen X. Registration for 3D point cloud using angular-invariant feature[J]. Neurocomputing, 2009, 72(16):3839-3844.

第一作者简介: 马天娇 (1992-), 女, 吉林吉林人, 硕士研究生, 研究实习员, 研究领域为数字图像处理与计算机视觉, 已发表论文1篇。

※通讯作者简介: 刘培勋 (1986-), 男, 博士, 副高级研究员。研究领域为数字图像处理与计算机视觉。

(编辑: 王智圣)

(上接第28页)

图20所示为3种车轮三向刚度仿真结果对比柱状图。表明在目前的橡胶参数和预压缩量下, 凹槽半径越大, 径向刚度和轴向刚度更高, 凹槽深的截面形状有利于提高弹性车轮的扭转刚度, 但凹槽较浅反而会降低扭转刚度。

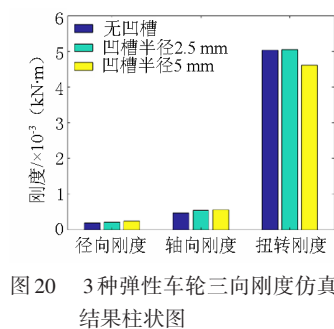


图20 3种弹性车轮三向刚度仿真结果柱状图

4 结束语

本文以某有轨电车弹性车轮为原型, 通过改变金属件的截面形状, 研究金属件截面结构对弹性车轮三向刚度的影响。根据上述的研究表明, 弹性车轮金属件的截面结构对弹性车轮刚度有一定影响: 径向刚度与轴向刚度随着凹槽半径的增大而增大, 有凹槽比无凹槽的刚度值大, 随着凹槽越深, 扭转刚度越大, 但凹槽过浅将无法提高扭转刚度, 反会稍降。总而言之, 适当增加弹性车轮金属件截面的凹槽能增大弹性车轮的三向刚度, 且增加凹槽结构也满足强度要求。因此, 本文的研究能为之后弹性车轮结构优化设计奠定基础, 为弹性车轮的实车应用提供参考。

参考文献:

- [1] 郑剑云. 压剪复合型橡胶弹性车轮有限元分析[J]. 机车车辆工艺, 2007(05):1-4.
- [2] 张乐. 弹性车轮结构刚度和强度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [3] 陈清, 段金兰. 弹性车轮的应用与典型故障分析[J]. 科学技术创新, 2017(21):15-16.
- [4] 陈虹, 周劲松, 石晨. 基于静强度分析的轻轨车辆弹性车轮参数设计[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(01):1-6.

- [5] 杨阳, 丁军君, 李芾, 等. 弹性车轮等效刚度对车辆动力学性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(03):63-70.
- [6] 杨阳. 压剪复合弹性车轮作用下轮轨动态特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] 左亮, 肖雄维. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数的一种确定方法[J]. 机械制造, 2008(07):38-40.
- [8] 黄彪, 戚援, 杜利清. 弹性车轮非线性有限元分析及疲劳强度校核[J]. 轨道交通装备与技术, 2014(02):44-47.
- [9] 侯传伦, 戚援, 王慎, 等. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的橡胶弹性车轮刚度特性分析[J]. 内燃机与配件, 2018(11):38-40.
- [10] 石怀龙, 戚援, 黄彪, 等. 弹性车轮压装过程仿真计算[J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(05):46-49.

第一作者简介: 刘虹蔚 (1995-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究领域为弹性车轮结构设计。

(编辑: 刁少华)

