

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.032

基于距离哈希的稀疏点集快速匹配算法研究

吴林鹏,周玲,杨晗,赵佳怡,张丽艳

(南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

摘要:针对不同坐标系下部分重叠的稀疏坐标点集,提出一种基于距离哈希的同名点快速稳健匹配算法。将各点与其邻近点的距离关系映射成一个二进制码身份标签,通过身份标签相似度计算,找出两个点集中满足设定阈值的候选匹配点对,从而建立初始匹配关系。据此计算刚体变换矩阵对两组点集进行配准,确定两组点集之间的精确匹配关系。实验结果表明:该算法不仅速度快、准确率高、对于噪点和低重叠度具有稳健性,而且对两个点集之间的初始相对位置没有任何限制。

关键词:机器视觉;稀疏点集;点集匹配;距离哈希;二进制码

中图分类号:TP391.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0169-04

Research on Sparse Point Set Fast Matching Algorithm Based on Distance Hash

WU Linpeng,ZHOU Ling,YANG Han,ZHAO Jiayi,ZHANG Liyan

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016, China)

Abstract:Based on distance hash, proposes a fast and robust matching algorithm with homonymous points for partially overlapping sparse coordinate point tsets in different coordinate systems. A binary code identity tag is mapped according to the distance relationship between each point and its adjacent points. Through the similarity calculation of identity tags, the corresponding similar point pairs meeting the set threshold in two point sets are found to establish the initial matching, based on which, the rigid body transformation matrix is calculated to register the two point sets, and the precise matching between the two point sets is defined. The experiment results show that the proposed algorithm is fast, accurate, robust to noises and low overlapping, and hasno restriction on the initial relative position between two point sets.

Keywords:machine vision;sparse point sets;point sets matching;distance hash;binary code

0 引言

点云配准技术是针对激光扫描仪、结构光测量系统等设备所获得的同一物体在不同视角下的海量点云数据进行合并的技术。最经典的点云配准算法是由 BESL 等^[1]提出的最近点迭代算法(iterative closest point, ICP),通过反复迭代寻找最佳同名匹配点对,以估计变换矩阵。但算法的运行速度和收敛性很大程度取决于点云的初始位姿,目标函数还易陷入局部最优的情况,故需要粗配准^[2-3]为其提供初始位姿,常作为二次精配准使用。

一种影响广泛的经典粗配准方法基于全等 4 点集(4-points congruent sets,4PCS)^[4],通过在目标点云和源点云之间寻找具有相同拓扑结构的 4 点对,来计算两个点集之间的变换矩阵,对噪声、遮挡和异常值具有较高的鲁棒性,4PCS 算法的主要问题在于比较慢,提取相似集和验证变换都比

较耗时。Super 4PCS^[5]、volumetric 4PCS^[6]、voxel 4PCS^[7]等方法都致力于提高 4PCS 的速度,但对于工业应用仍然配准精度较低,配准速度也难以满足一些较复杂应用的要求。

基于哈希的文件检索方法^[8]是近年来广受关注的在海量数据中寻找相似文档的方法。它的基本思想是通过找到一个合适的哈希函数,将数据库中的每个项目映射为一个简单的二进制代码,并且使得相似的项目具有相似的二进制代码。受上述基于哈希方法的二进制编码在相似性匹配和检索中成功应用的启发,本文针对部分重叠的稀疏点集的同名点匹配问题,提出一种基于距离哈希的二进制编码的快速稳健匹配方法。

1 基于哈希的稀疏点云匹配算法

给定同一物体从任意两个不同角度获得的三维点集 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$,若存在匹配点对集合 $\mathbf{C}\{p_i, q_j\}$ ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$),其中 $\forall p_i \subseteq \mathbf{P}, q_j \subseteq \mathbf{Q}$,

$\|T(p_i) - q_j\| \leq \delta$ 都成立, δ 为较小常数, T 为点集 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 之间的刚性变换。则当集合 $\mathbf{C}$ 含有元素数量最多时, 两个点集之间的刚性变换为最佳刚性变换 T_{best} , 此时记 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\text{max}}$ 为最大匹配公共集。最大公共集 (largest common pointset, LCP) 问题^[9] 就是通过不断比较元素寻求 $\mathbf{C}_{\text{max}}$, 从而获得两个点集之间的最佳刚性变换。LCP 是点集配准技术要达到的目标, 也是衡量配准质量的一个标准。

1.1 距离哈希编码

对点集 $\mathbf{P}$ 中任一点 p_i , 可以借助 k - d 树^[10] 快速为其查找自身所在点集中的 K 个邻近点 p_{ik} ($k=1, 2, \dots, K$), 随后将点 p_i 与 p_{ik} 之间的欧氏距离转化为二进制身份码, 如图 1 所示。为了更清楚地展示编码过程, 图 1 中仅显示 p_i 的 6 个邻近点。

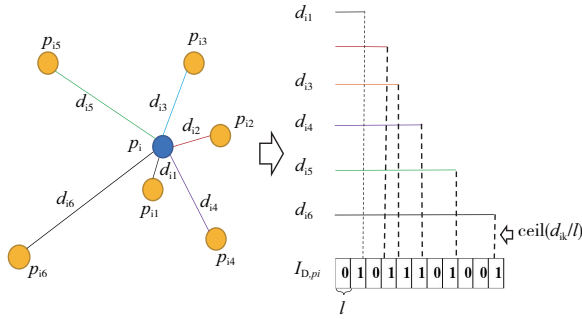


图 1 距离哈希算法

在对两个点集 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 中的点进行二进制编码时, 首先会设立一个长度为 l 的固定步长, 将欧氏距离转化为步数 S 。在点 p_i 与其 K 个邻近点 p_{ik} 的距离中, d_{max} 为最大距离。对 d_{max}/l 向上取整作为该身份码的长度 S , 即

$$S = \text{ceil}(d_{\text{max}}/l) \quad (1)$$

根据 S 和 l 为 p_i 建立一个二进制位数组 I_{D, p_i} , 该数组含二进制位个数为 S , 每一位初始值为 0。邻近点中 p_{ik} 与 p_i 之间的欧氏距离为 d_{ik} , 转化成步数 s_{ik} 为

$$s_{ik} = \text{ceil}(d_{ik}/l) \quad (2)$$

若二进制位数组 I_{D, p_i} 的第 s_{ik} 位为 1, 则等价于 p_i 在步数为 s_{ik} 的位置存在一个邻近点。将每个邻近点映射到 p_i 的二进制数组上, 则点 p_i 与其 K 个最邻近点之间的距离特征被转换为二进制码 I_{D, p_i} , 定义 I_{D, p_i} 为点 p_i 的二进制身份标签。

1.2 相似度比较

通过上一节距离哈希算法, 将点集 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 中的数据点与其临近点之间的距离关系映射为二进制身份编码, 从而使得点集中任一点都具有一个

二进制码身份标签。该身份标签在保留原点集各点与其邻近点之间距离特征的同时大大简化了数据的存储。在完成两个点集中所有数据的二进制身份编码后, 将点集 $\mathbf{P}$ 中数据的身份标签与点集 $\mathbf{Q}$ 中数据的身份标签逐一进行对比, 即对二进制码 I_{D, p_i} ($i=1, 2, \dots, m$) 和 I_{D, q_j} ($j=1, 2, \dots, n$) 进行按位“与”运算, 将其结果记为 $r = I_{D, p_i} \& I_{D, q_j}$, 计算 r 中二进制位值为 1 的总位数 N_r , 则两点之间的相似度 M 为

$$M = 2N_r / (N_{p_i} + N_{q_j}) \quad (3)$$

式中 N_{p_i} 和 N_{q_j} 分别为 I_{D, p_i} 和 I_{D, q_j} 中二进制位值为 1 的总位数。在点集 $\mathbf{Q}$ 中循环, 求出使 M 最大的序号 J , 并记最大相似度 $M = M_{\text{max}}$, 若 M_{max} 的值大于设定阈值 β , 则可认为 p_i 和 q_j 是一对候选匹配点对。经过上述相似度计算和比较后, 可获得点集 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 之间的初始匹配点对集合 $\mathbf{C}_f$ 。

1.3 基于最邻近点的精确匹配

在初始匹配点对集合 $\mathbf{C}_f$ 内, 点对之间可能存在误匹配的情况, 而其中相似度较大的一些点往往是正确的匹配点对。因此, 本文在集合 $\mathbf{C}_f$ 中, 取相似度最大的 L 个点对计算初始刚体变换 $T_f(R_f, t_f)$, 将点集 $\mathbf{P}$ 中的各点转换至 $\mathbf{Q}$ 所在的坐标系下, 即做变换:

$$p_i^f = R_f p_i + t_f \quad (4)$$

经过变换后的点集 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 中的匹配点对应该具有相近的位置, 对应点间距离应在三维测量产生的误差范围内。为此, 通过查找最邻近点的方法来进行更精确的匹配。在点集 $\mathbf{Q}$ 所形成的 k - d 树中搜索 p_i^f 的最邻近点 q_{rst} , 当最邻近点 p_i^f 与 q_{rst} 的距离小于两组点云的测量误差之和时, 则认为 p_i 和 q_j 是一对正确的匹配点。最终获得精确匹配点对集合 $\mathbf{C}_{\text{max}}$ 。在集合 $\mathbf{C}_{\text{max}}$ 基础上通过奇异值分解算法 (singular value decomposition, SVD), 即可求解 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 之间的刚体变换矩阵, 进而完成点集之间的配准。

2 实验结果与分析

为验证本文算法效果, 以工业中常见且具有不同表面特征的直升机和汽车为例进行测试, 所采用实验数据为自主研发的工业近景摄影测量软件所获得的直升机尾部和汽车的特征点集数据。

图 2 显示了对直升机尾部数据进行匹配及配准的结果。图 2(a) 中, $\mathbf{P}$ 为直升机尾部测量数据, $\mathbf{Q}$ 为直升机尾部数据的一部分, 与 $\mathbf{P}$ 之间存

在旋转角度为 45° , 平移为 $\{1\ 000, 2\ 000, 0\}$ 的刚体变换, 并添加均值为 0、方差为 0.2 的高斯白噪声, P 和 Q 含数据点个数分别为 1 220 和 190。图 2(b) 为采用本文算法对两组点集进行匹配的结果, 每条蓝色线段连接了一对匹配点对(本刊黑白印刷, 相关疑问咨询作者)。图 2(c) 显示在正确的匹配点对集合基础上, 通过方程求解计算实现了点集之间的配准。

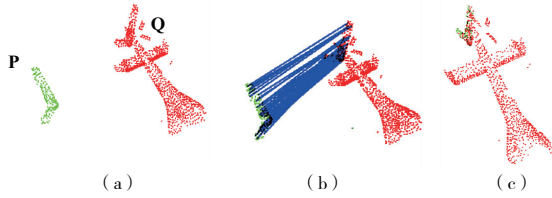


图 2 直升机尾部数据匹配及配准结果

在三维测量过程中, 由于测量角度或测量方式的不同, 两个点集 P 和 Q 之间可能存在以下不同重叠关系: ① Q 为 P 的一部分; ② P 和 Q 存在部分交叉; ③ Q 为 P 存在数据缺失情况下 P 的较稀疏点集。因此, 本文采用直升机尾部和汽车点集数据, 分别对以上 3 种不同情况进行测试。如图 3 所示的汽车数据及图 4 的直升机尾部数据, 第 1 到第 3 组分别对应了两组点集重叠关系为以上①、②和③的情况。同时, 实际测量过程中也会存在噪声干扰等情况。为模拟实际环境, 分析算法的鲁棒性和配准精度, 实验中为 Q 添加均值为 0、方差为 0.3 的高斯白噪声, 并在两点集之间产生 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间任意角度的旋转和随机平移。在情况③下, Q 较 P 具有 50% 的随机数据丢失。考虑到由于稀疏点集无法提供法向量、曲率或其他线、面等特征, 多数配准算法对此不适用, 经典的 4PCS 方法基于同一平面 4 点组仿射不变性寻找对应关系, 虽不受此类限制, 但速度过慢, 将本文算法与其较成熟的改进算法 super 4PCS 方法进行比较。

本文以旋转误差和平移误差来评估配准效果。首先将旋转矩阵 R 转化为按照固定顺序 $z-y-x$ 内旋的欧拉角, 采用欧拉角来计算旋转误差 e^R 。旋转误差和平移误差分别被定义如下:

$$\begin{cases} e^R = \|R_m - R_g\| \\ e^t = \|t_m - t_g\| \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\{R_m, t_m\}$ 和 $\{R_g, t_g\}$ 分别表示刚体变换的实际值和估计值。为进一步比较配准性能, 表 1 中列

出了图 3 和图 4 中各组不同数据分别采用 super 4PCS 和本文算法时所用时间及误差。对图 3、图 4 和表 1 的数据进行分析可以看出, 在配准精度上, 本文算法较 super 4PCS 具有较大优势, 对两点集处于各种不同重叠关系均能获得准确的配准结果。在速度方面, 对于汽车数据, 虽然 super 4PCS 速度较快, 但得到的配准结果均有较大偏差。根据文献[5], super 4PCS 虽然优化了提取 4 点集的时间, 但在点集验证过程的速度仍然没有太大改善, 对文中点数不多的模型进行配准时仍然异常耗费时间。在本文直升机尾部数据实验中, 其耗费时间也较长, 而本文算法则能快速稳定地获取正确配准结果。可见本文算法对于三维视觉测量中所获得的稀疏点集之间的匹配和配准具有重要意义。

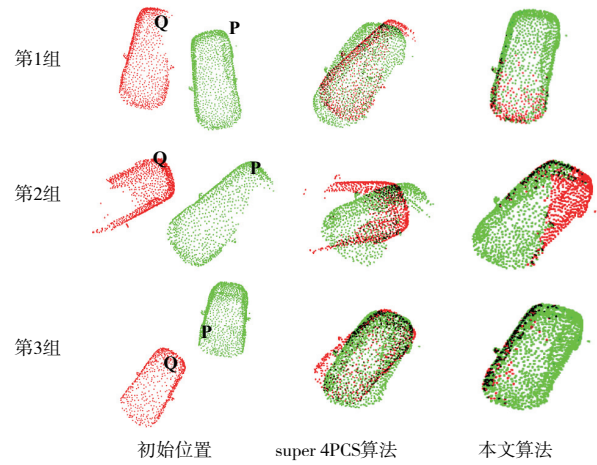


图 3 汽车数据匹配结果比较

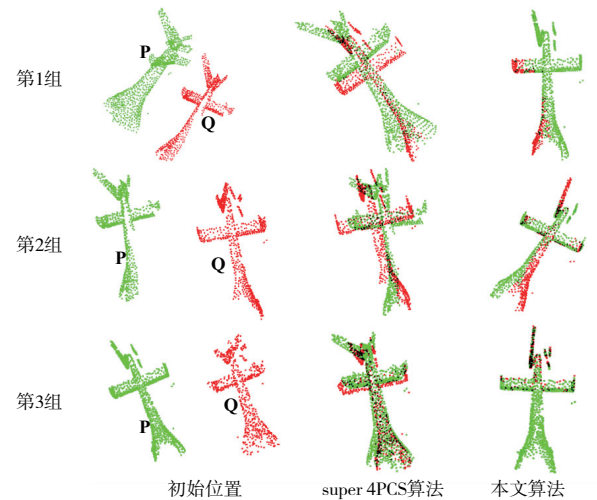


图 4 直升机尾部数据配准结果比较

表 1 汽车和直升机尾部数据配准时间及误差

实验数据		三维点数量		super 4PCS 算法			本文算法		
		P	Q	时间/s	$e^R/(^\circ)$	e^l/mm	时间/s	$e^R/(^\circ)$	e^l/mm
车身数据	第 1 组	1 638	1 092	0.258	19.846	0.863	0.385	0.003	0.071
	第 2 组	1 092	1 091	0.254	9.824	260.209	0.256	0.064	0.169
	第 3 组	1 638	819	0.196	9.920	177.025	0.301	0.017	0.223
直升机尾部数据	第 1 组	1 218	812	1.356	4.943	29.384	0.218	0.003	0.391
	第 2 组	812	811	1.399	16.562	11.069	0.152	0.055	0.324
	第 3 组	1 218	609	1.501	4.960	3.121	0.181	0.015	0.223

3 结语

本文对基于标记点的三维视觉测量所获得的稀疏点集数据,提出一种基于距离哈希的快速匹配方法。将点集中任一点与邻近点的距离在刚体变换下的不变性作为点集匹配的特征,通过距离哈希方法将距离关系映射为一个二进制码身份标签,快速的二进制码相似度计算方法能够实现点集间同名匹配点的高效查找。最后通过基于 $k-d$ 树的最邻近点查找方法进行距离校验,从而实现点集间的精匹配。基于汽车和直升机尾部测量数据的多个实验表明,本文算法速度快,准确率高,对噪点及各种不同重叠情况具有稳健性,且对两个点集之间的初始位置没有任何限制,对于表面形状复杂的物体亦能获得良好的结果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DÍEZY, ROUREF, LLADÓX, et al. A qualitative review on 3D coarse registration methods[J]. ACM Computing Surveys, 2015, 47(3): 1-36.
- [3] BUENO M, GONZÁLEZ J, MARTÍNEZ S, et al. Automatic point cloud coarse registration using geometric keypoint descriptors for indoor scenes[J]. Automation in Construction, 2017, 81: 134-148.
- [4] AIGER D, MITRA N J, COHEN-OR D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-10.
- [5] MELLADO N, AIGER D, MITRA N J. Super 4PCS fast global pointcloud registration via smart indexing[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(5): 205-215.
- [6] HUANG J D, KWOK T H, ZHOU C. V4PCS: volumetric 4PCS algorithm for global registration[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(11): 111403.
- [7] XU Y S, BOERNER R, YAO W, et al. Pairwise coarse registration of point clouds in urban scenes using voxel-based 4-planes congruent sets[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 151: 106-123.
- [8] TIAN D H, JIA X Q, MA R, et al. BinDeep: a deep learning approach to binary code similarity detection[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 168: 114348.
- [9] JUAREZ PAULINO D S, DIBIO L B, FLAVIO B V. A dynamic approach for approximate pairwise alignment based on 4-points congruence sets of 3D points[C]// 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, Brussels, Belgium; IEEE, 2011: 889-892.
- [10] BENTLEY J L. Multidimensional binary search trees used for associative searching[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(9): 509-517.

收稿日期: 2023-02-15