

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202005019



稀疏激光扫描点的自主移动 机器人地图创建

贾丙佳, 李平

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 在自主移动机器人实际地图创建中, 针对迭代最近点(ICP)算法不符合一对一单映射关系的问题, 提出一种稀疏扫描点的对应点对搜索方法. 首先, 在方向和位置上对相邻两次激光扫描点集进行粗配准; 然后, 对配准结果建立一种对应点对搜索机制, 剔除无效对应点; 最后, 采用 ICP 算法对剩余数据进行精配准. 结果表明: 文中方法可有效处理无效对应点, 提高算法的配准精度, 在实际环境中具有准确性和有效性.

关键词: 激光雷达数据配准; 地图创建; 迭代最近点; 自主移动机器人

中图分类号: TP 242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)02-0251-08

Map Creation of Autonomous Mobile Robot Using Sparse Laser Scanning Points

JIA Bingjia, LI Ping

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In the actual map creation of autonomous mobile robot, aiming at the problem that the iterative closest point (ICP) algorithm does not conform to the one-to-one mapping relationship, a corresponding point pair search method for sparse scanning points is proposed. Firstly, a coarse registration of the set of points between two adjacent laser scans in the orientation and position. Then, establish a corresponding point pair search mechanism for the registration result to eliminate invalid corresponding points. Finally, the ICP algorithm is applied to accurately register the remaining data. The experimental result shows that the proposed method can effectively deal with invalid corresponding points, improve the registration accuracy of the algorithm, and is accuracy and effectiveness in the actual environment.

Keywords: laser lidar data matching; map creation; iterative closest point; autonomous mobile robot

地图创建是移动机器人研究领域的核心及热点问题. 如果没有精确的地图作为先验条件, 机器人就无法自主执行一些任务, 也无法确定自身相对于环境的位姿(位置和姿态角). 因此, 利用传感器感知周围环境信息, 是移动机器人必须具备的一项基本功能^[1-2]. 常用的传感器有声波传感器^[3]、视觉传感器^[4]和激光传感器^[5]等. 声波传感器具有发散性, 测量距离越远, 误差越大. 视觉传感器对环境和处理速度的要求较高. 相较而言, 激光传感器在精度、速度和稳定性方面都具有更好的性能^[6].

收稿日期: 2020-05-29

通信作者: 李平(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要从事非线性系统与智能控制、复杂控制系统的研究. E-mail: pingping_1213@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603144); 福建省自然科学基金资助项目(2018J01095); 福建省高校产学研合作科技重大项目(2013H6016); 华侨大学青年教师科技创新资助计划项目(ZQN-PY509)

在利用激光雷达创建环境地图方面,国内外众多学者已进行大量的研究^[7-9].其中,应用最为广泛的是迭代最近点(ICP)算法^[10].ICP 算法可以对不同时刻传感器获取的二维或三维环境深度信息进行配准,寻求一组旋转和平移参数,使配准后的两帧深度数据达到最大程度的重叠^[11-12],同时,经计算可得不同时刻传感器在环境中的位姿.然而,传统 ICP 算法在实际应用中存在收敛速度慢、对给定初值敏感、易陷入局部最优、相邻两次扫描点不存在单映射关系等缺陷^[13-15].为解决这些问题,文献[16]采用基于改进 k -D 树的方法,提高对应点查找速度.文献[17-19]采用基于点-直线匹配(PLICP)方法和几何方法解决扫描点集不符合单映射的问题,筛选出对应点对,并减少点对的搜索次数.文献[20]提出一种基于判断点云领域法向量夹角的自动配准算法.基于此,针对激光雷达相邻扫描点集之间不存在一对一单映射关系的问题,本文提出一种稀疏扫描点的对应点对搜索算法.

1 二维点集粗配准

1.1 扫描点的采集

通过传感器采集环境的深度数据,采用 Neato XV-11 型激光雷达(图 1),其有效测量范围为 0.15~4.00 m,每旋转 360°会扫描产生 360 个距离数据,即 1°对应 1 个距离数据,并返回 1 组极坐标表示的二维扫描点集 $O=\{(\theta_i,\rho_i)|i=0,\cdots,n\}$.其中: θ_i 为激光雷达自身扫描第 i 度的角度信息; ρ_i 为第 i 个角度上的距离; n 为扫描点的个数.

将扫描点集数据从极坐标系转换到直角坐标系,有

$$x_i=\rho_i\cos\theta_i,\quad y_i=\rho_i\sin\theta_i,$$

(1)

并用集合 $P=\{(x_i,y_i)|i=1,\cdots,n\}$ 表示.

在数据采集过程中,通常间隔一定的时间或移动机器人位姿改变一定的阈值时,进行一次数据采集.由于运行中的机器人位姿不会发生突变,且具有连续性,故采集到的相邻时刻扫描数据点集具有明显的对应关系.激光扫描简图,如图 2 所示.图 2 中:红色点表示机器人在 M_0 处的激光扫描点;蓝色点表示机器人在 M_1 处的激光扫描点;车载红点和蓝点表示激光雷达的安装位置;点之间的连线表示激光扫描时的射线,图中仅画出一部分; R 表示机器人;黑色边框表示墙壁; $A\sim C$ 表示相同位置不同时刻激光点的分布.由于相邻两个时刻机器人的位姿无较大变化,故相邻两个时刻的数据集将大部分重叠.

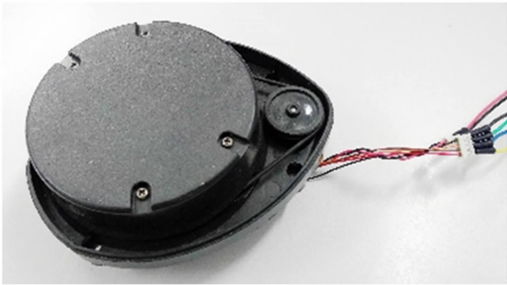


图 1 激光雷达实物图

Fig.1 Physical picture of laser lidar

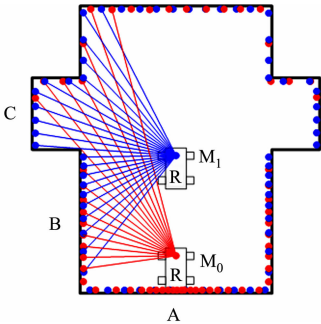


图 2 激光扫描简图

Fig.2 Laser scanning diagram

1.2 问题的分析

自主移动机器人创建环境地图时,在环境中不断地移动,一方面,有新的环境进入激光雷达的可测范围,也有当前环境远离可测范围,导致相邻两个时刻激光雷达产生的两帧点集数据不能完全重叠,而自主移动机器人连续、不突变的运动特点使两帧数据只有小部分无法重叠,不重叠的数据代表新地图的特征,由此创建出增量式的地图;另一方面,即使机器人不移动,激光雷达的测量噪声也会导致两帧数据不完全重叠,这种测量噪声无法准确排除,特别是在复杂的环境中,更无法排除这种噪声是测量噪声还是环境特征.

在激光扫描简图中,机器人两次扫描环境时的姿态角没有变化,仅改变位置.然而,在实际创建地图过程中,机器人的位置和姿态角均发生变化,此时,以激光雷达为坐标系的扫描点集数据就会发生错位,

进一步使两帧扫描点集重叠部分变少. 为了使 ICP 算法具有最佳的初值, 快速收敛到正确的结果, 前期的粗匹配尤为重要.

1.3 方向和位置的配准

为了使相邻时刻激光雷达扫描数据尽可能最大程度地重叠, 对扫描数据进行粗配准. 采用方向柱状图匹配法^[21], 对每一帧扫描点集计算连续两个扫描点构成直线的角度, 得到两帧扫描点集的角度柱状图, 再经互相关得到两帧扫描点集的相对角度对应关系, 互相关函数为

$$\omega(Y) = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{1}{2Z} \int_{-Z}^Z h_1(X) h_2(X+Y) dX, \quad (2)$$

其离散形式为

$$\omega(J) = \sum_{I=1}^n h_1(I) h_2(I+J). \quad (3)$$

式(2), (3)中: h_1, h_2 分别为相邻时刻的扫描点集; X, Y, Z, I, J 均为方程变量.

由于激光雷达通过不同位姿对同一环境扫描得到的数据方向柱状图仅相差一定的角度, 利用互相关函数搜索到的最大值即两次扫描数据的相对角度差 $\Delta\theta$. 方向配准后, 进行位置配准. 分别计算两帧扫描点集数据的重心, 计算重心间的距离, 可得 x 轴和 y 轴的距离差, 即位置配准在 x 轴和 y 轴方向移动的距离.

通过上述方向和位置配准处理后, 两帧数据在主方向和重心上都能大致重合, 这将有利于后续准确建立对应点对搜索机制, 以及确定扫描点间一对一单映射关系. 需要注意的是, 在进行粗配准时, 先要进行方向配准, 只有方向配准到一致时, 位置配准才能更加准确.

2 二维点集精配准

在不采用编码器信息的情况下, 仅利用激光雷达采集的扫描点集数据进行环境地图的创建. 由于自主移动机器人在运行过程中的位姿不会发生突变, 相邻时刻两帧扫描点集数据具有明显的对应关系, 故采用 ICP 算法计算激光雷达在相邻两个时刻的位姿变化量.

2.1 ICP 算法概述

ICP 算法^[10]是基于最小二乘优化思想的配准算法, 具有精度高、编程实现简易等优点.

将激光雷达当前扫描点集变换到与参考扫描点集相同的坐标系下, 有

$$Q_{1:n} = R \cdot P_{1:n} + T. \quad (4)$$

式(4)中: $Q_{1:n}, P_{1:n}$ 分别为参考扫描点集与当前扫描点集, 两个点集数据数量相等; R 为 3×3 的旋转矩阵; T 为 3×1 的平移向量.

ICP 算法有以下 6 个步骤.

步骤 1 给定参考点集 $Q_{1:n} = \{q_1, \dots, q_n\}$, 当前点集 $P_{1:n} = \{p_1, \dots, p_n\}$, 计算两点集的重心 $\mu_q =$

$$\frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} q_i, \mu_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} p_i, \text{ 其中, } N_q \text{ 为 } q \text{ 点集的个数, } N_p \text{ 为 } p \text{ 点集的个数.}$$

步骤 2 去重心, 使 $Q' = \{q_i - \mu_q\} = \{q'_i\}, P' = \{p_i - \mu_p\} = \{p'_i\}$.

步骤 3 计算 $W = \sum_{i=1}^{N_p} q'_i p'^T_i$.

步骤 4 对 W 进行奇异值分解(SVD), $W = U \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} V^T$, U, V 均为酉矩阵, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 均为 W 的

奇异值, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

步骤 5 计算旋转矩阵 R 和平移矩阵 $T, R = UV^T, T = \mu_q - R\mu_p$, 使误差平方最小, 即有 $E(R, T) =$

$$\min_{R, T} \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|q_i - R p_i - T\|^2.$$

步骤 6 如果 $E(R, T)$ 小于某一给定的阈值或大于预设的最大迭代次数, 则停止迭代计算; 否则, 对

$P_{1:n}$ 进行旋转和平移变换, $P'_{1:n} = \mathbf{R}P_{1:n} + \mathbf{T}$, 并返回步骤 2, 直至满足条件为止.

ICP 算法的核心是最小化目标函数, 即

$$\begin{aligned} E(\mathbf{R}, \mathbf{T}) &= \min_{\mathbf{R}, \mathbf{T}} \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|q_i - \mathbf{R}p_i - \mathbf{T}\|^2, \\ \text{s. t. } \mathbf{R}^T \mathbf{R} &= \mathbf{I}, \quad \det(\mathbf{R}) = 1. \end{aligned} \tag{5}$$

经迭代计算出正确的配准结果.

2.2 问题分析

ICP 算法的实现原理, 必须满足以下 2 个假设.

1) 参考扫描点集和待配准的当前扫描点集的个数完全相同, 对应点对需完全满足一对一单映射对应关系.

2) 选取合适的 \mathbf{R}, \mathbf{T} 作为迭代初始值, 使最终目标函数最小, 迭代次数最少.

然而, ICP 算法的假设过于理想化, 这两个假设在实际应用中很难得到满足.

首先, 自主移动机器人搭载激光雷达在环境中移动, 探测到的新环境造成相邻时刻激光扫描数据不完全重合(图 2), 则 $A \sim C$ 处会出现以下 3 种情况: 1) 情况 1, 前一次的扫描点集多于后一次; 2) 情况 2, 前一次的扫描点集和后一次相等; 3) 情况 3, 前一次的扫描点集少于后一次. 如果把前一次的扫描点集当成参考扫描点集, 则相对于前一次的扫描点集, 后一次的点集会出现一对多、一对一和多对一的情况, 情况 2 的两帧点集则具备一对一的单映射对应关系.

对应点示意图, 如图 3 所示. 图 3 中: 红色点为参考扫描点; 蓝色点为当前扫描点. 将蓝色点配准到红色点位置, 在 $A \sim C$ 处不存在一对一单映射对应关系, 而其他位置的多数点存在明显的对应关系.

其次, 相邻时刻机器人的位姿变化并不一致, 迭代初值必须随之进行适当地更改. 受上述因素影响, 直接使用 ICP 算法进行配准, 结果会存在较大误差.

因此, 两帧扫描点集数据对应点对的查找及迭代初值的设置是实现 ICP 精配准的关键, 在此基础上才能创建较为精确的地图.

2.3 对应点对搜索机制

首先, 不满足一对一单映射对应关系的数据点可以忽略, 即从当前扫描点集中剔除.

然后, 重建点集, 使最终配准的两帧扫描点集具有一对一单映射对应关系. 由于在精配准之前, 已进行了粗配准, 但其只能减小扫描点集之间的错位, 并不能在 A, B 处实现完全重叠. C 处是小车在 M_1 位置的环境扫描点(图 2), 代表新的环境特征, 而在 M_0 处的扫描点集中并没有对应的点, 因此, 需要对 M_1 处扫描得到的数据进行稀疏处理, 具体有以下 4 个步骤.

步骤 1 根据两帧扫描点集, 构建曼哈顿距离矩阵, 第 i 个当前扫描点和第 j 个参考扫描点之间的曼哈顿距离 $d(i, j)$ 为

$$d(i, j) = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|. \tag{6}$$

式(6)中: x_i, y_i 分别为第 i 个点的横、纵坐标; x_j, y_j 分别为第 j 个点的横、纵坐标; $i, j \leq 360$.

矩阵中的每个元素表示 $Q_{1:n}$ 点集中的每一个点相对于 $P_{1:n}$ 点集中每一个点的距离, 如图 4 所示. 图 4 中: 水平方向排列的是 i 个当前扫描点坐标; 垂直方向排列的是 j 个参考扫描点坐标.

步骤 2 搜索初始最小值, 矩阵中第一列最小值 $d_{\min}^1 = D_{\min}(j, 1), j = 1, \dots, n$.

步骤 3 构建 3×1 的动态搜索窗口, 按照初始最小值在矩阵中的索引, 进行后续迭代搜索, 需满足

$$d_{\min}^{i+1} = \begin{cases} D(j-1, i+1), & i, j \in 1, \dots, n, \\ D(j, i+1), & i, j \in 1, \dots, n, \\ D(j+1, i+1), & i, j \in 1, \dots, n. \end{cases} \tag{7}$$

确保搜索到的点是当前列的最小值, 如果 $d_{\min}^{i+1} = D(j, i+1)$, 说明搜索到最小值; 如果 $d_{\min}^{i+1} = D(j -$

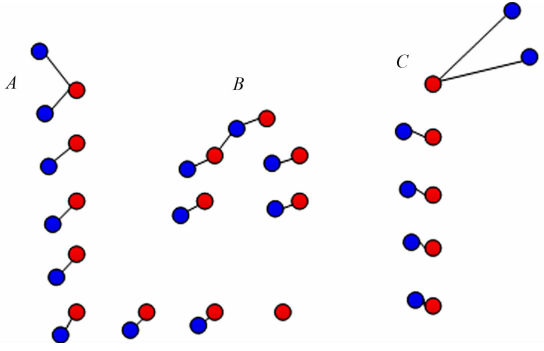


图 3 对应点示意图
Fig. 3 Schematic diagram of corresponding points

$1, i+1)$ 或 $d_{\min}^{i+1} = D(j+1, i+1)$, 说明没有搜索到最小值, 需要向上或向下移动搜索窗口, 继续搜索. 搜索路径示意图, 如图 5 所示. 图 5 中: 红点表示下一步要搜索的 3 个距离点; 右侧括号内的值表示索引值; 红色虚线框表示 3×1 的动态搜索窗口. 如果窗口中间值没有达到最小, 则动态搜索窗口将向距离值

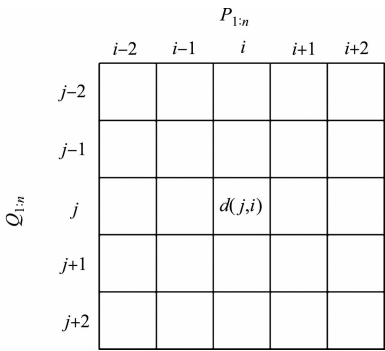


图 4 曼哈顿距离矩阵示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Manhattan distance matrix

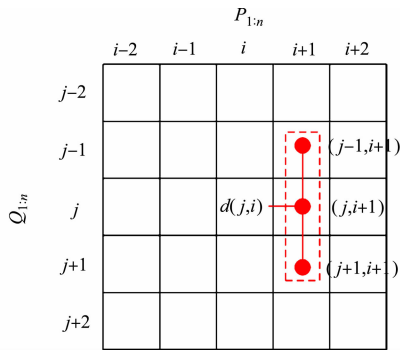


图 5 搜索路径示意图

Fig. 5 Schematic diagram of search path

减小的方向移动一格, 继续搜索最小值.

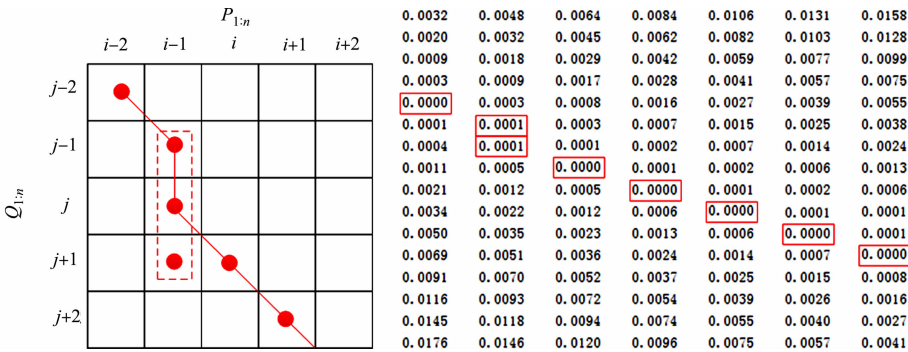
步骤 4 重复步骤 3, 直至搜索完 i 列数据.

完成步骤 1~4, 可搜索出一条路径. 迭代搜索过程中需要满足以下 2 个约束条件.

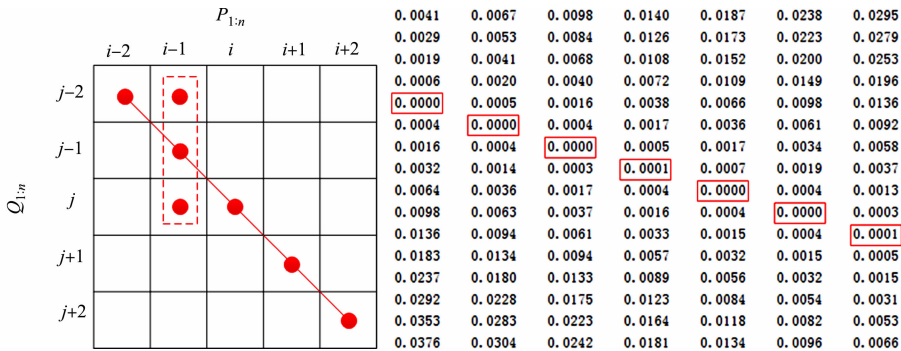
1) 连续性. 相邻搜索点是连续的, 即下一个搜索点必须是 $D(j-1, i+1)$, $D(j, i+1)$ 和 $D(j+1, i+1)$ 这 3 点中的一点.

2) 单调性. 垂直方向按照曼哈顿距离矩阵中数值递减的方向进行搜索, 水平方向按照当前扫描点 $P_{1:n}$ 索引的排列顺序依次搜索.

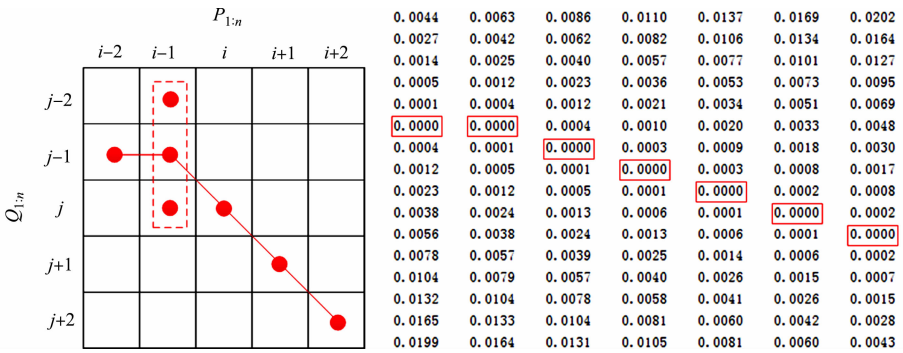
对于节 2.2 描述的 3 种情况, 其路径搜索示意图, 如图 6 所示. 图 6 中: 左侧为搜索路径原理分析图; 右侧为实验结果图; 左侧红色虚线框表示一次搜索过程需搜索的 3 个点; 右侧红色实线框是搜索到的距离最小值. 由于采用科学计数法, 搜索路径中的距离最小值并不都为零.



(a) 一对多



(b) 一对一



(c) 多对一

图 6 路径搜索示意图

Fig. 6 Schematic diagram of path search

2.4 稀疏扫描点

搜索路径上的动态搜索窗口并没有过多地偏离上一次搜索到的最小距离值,即动态搜索窗口的索引值变化量在[0 1]范围内变化,且正常情况下的索引值变化量为 $\Delta i=1, \Delta j=1$. 在索引值变化量 $\Delta i, \Delta j$ 不为 1 时,删除该索引值对应的当前扫描点和参考扫描点. 此外,一方面,当索引值变化量较大时,点会被删除(图 3);另一方面,设置 1 个最小曼哈顿距离阈值 D ,当搜索到的最小值比 D 大时,这两种情况下同样删除该索引值对应的当前扫描点和参考扫描点,这些对应点视为无效对应点.

删除无效对应点后,重建当前扫描点集,可得到稀疏扫描点集.

2.5 点集精配准

采用 ICP 算法对稀疏扫描点集与参考扫描点集进行精配准,此时,待匹配的是过滤后的数据点,已排除一对多和多对一的情况,可获得较精确的 ICP 配准结果. 经配准可得旋转矩阵和平移向量,应用式(4)对当前扫描点的原始点集数据进行变换操作,将当前扫描点匹配到参考扫描点坐标系中. 然后,将配准前的当前扫描点作为参考扫描点,激光雷达下一时刻扫描得到的点集作为当前扫描点集,进行下一步配准,并将上一次配准结果作为该次配准的初值. 计算获得该次配准结果并累加之前的配准结果,对当前扫描点集进行变换. 依此类推,可创建出整个环境地图. 地图创建流程图,如图 7 所示.

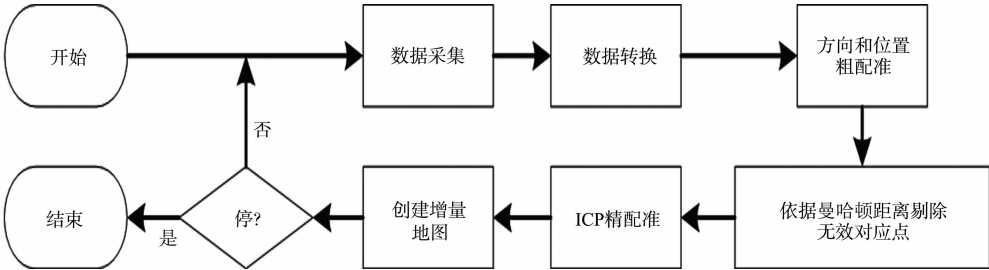


图 7 地图创建流程图

Fig. 7 Flowchart of map creation

3 结果与分析

应用 MATLAB 仿真平台,在局部环境下,通过相邻两帧扫描点集验证文中方法的有效性. 实验平台为 Inert(R) Core(TM) i3-3220 CPU, 3.30 GHz 主频和 4.00 GB 内存的笔记本电脑, Windows 10 操作系统. 实验数据来自 Neato XV-11 型激光雷达,开发平台为微软 Microsoft Visual Studio 2017,采用 C# 编程语言编写激光雷达的数据解析代码和扫描点数据配准代码.

相邻两帧扫描点集配准结果,如图 8 所示. 图 8 中:红色点为参考扫描点;蓝色点为当前扫描点. 实验目的是将蓝色点配准到红色点的位置. 由图 8 可知:在一定距离阈值内,存在部分无法建立对应关系的数据点;剔除无效点后,红色和蓝色数据已最大程度地重叠. 将当前扫描点作为参考扫描点,对下一帧点集数据进行配准,进而将两帧点集数据进行同样的处理,直至停止数据采集,即可建立环境地图.

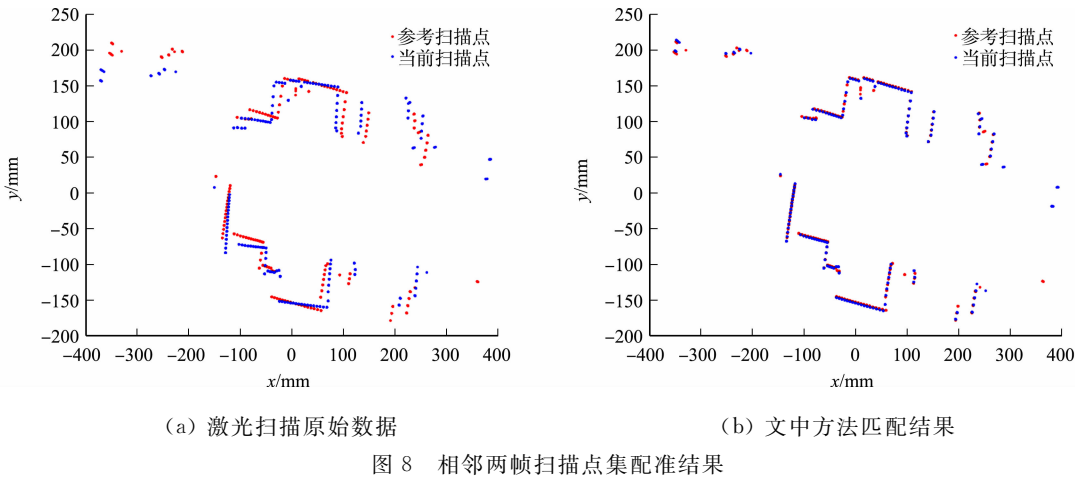


Fig. 8 Matching results of two adjacent scan point sets

为验证文中算法配准结果的准确性,将其与 ICP 算法、文献[16]方法、文献[17]方法、文献[20]方法进行对比. 不同方法的配准结果,如表 1 所示. 表 1 中: e 为配准误差; C 为迭代次数.

由表 1 可知:在相同的扫描点集下,ICP 算法的配准误差较大;文献[16]方法采用 k -D 树加速对应点的查找,迭代次数减少,但配准误差较大;文献[17]方法采用点-直线的匹配方法,迭代次数和配准误差均有降低;文献[20]方法虽然滤除了测量噪声点,但依然存在相邻两帧扫描点集无效对应的点;文中方法在前处理过程中将无效对应点剔除,其配准误差和迭代次数均优于其他方法,可提高地图创建的准确性.

在实际环境中,激光雷达多帧扫描数据两两匹配的结果,如图 9 所示. 由图 9 可知:文中方法可以消除 ICP 算法因不满足一对一单映射对应关系而产生的数据错位问题. 由此可知,实际环境中的配准结果验证了文中方法的有效性.

4 结束语

提出一种稀疏激光扫描点的自主移动机器人地图创建方法. 在粗配准后,运用稀疏扫描点的对应点对搜索方法,对激光雷达环境扫描点集建立对应点对搜索机制,根据曼哈顿距离剔除无效对应点,在精配准时提高 ICP 算法的配准精度,减少搜索次数,建立环境地图. 实验结果验证了文中方法的准确性和有效性.

参考文献:

[1] 钱晓明,张浩,王晓勇,等. 基于激光扫描匹配的移动机器人相对定位技术研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):14-21. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.003.

[2] SABET M T,DANIALI H R M,FATHI A R,*et al.* Experimental analysis of a low-cost dead reckoning navigation system for a land vehicle using a robust AHRS[J]. Robotics and Autonomous System,2017,95(5):37-51. DOI:10.1016/j.robot.2017.05.010.

[3] 袁帅,李素芳,毛红民,等. 基于超声波传感器的机器人室内环境重构[J]. 信息技术,2016,34(6):6-7. DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2016.34.006.

[4] 程前,聂卓赞,方浩澄,等. 单目视觉定位实现机器人跟踪的实验系统和控制方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),

表 1 不同方法的配准结果
Tab. 1 Registration results of different methods

配准算法	e/mm	C
ICP 算法	178.20	17
文献[16]方法	176.71	10
文献[17]方法	5.77	11
文献[20]方法	7.29	12
文中方法	5.46	10



图 9 实际环境配准图

Fig. 9 Registration map of actual environment

- 2019, 40(4):542-548. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201811038.
- [5] 孟祥瑞. 基于多线激光雷达的移动机器人环境感知与导航控制研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2018.
- [6] 宗文鹏, 李广云, 李明磊, 等. 激光扫描匹配方法研究综述[J]. 中国光学, 2018, 11(6):914-930. DOI:10. 3788/CO. 20181106. 0914.
- [7] 李鑫. 基于激光雷达的同时定位与建图方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2015.
- [8] TIAR R, LKAROUF M, AZOUAOU O. Fast ICP-slam for a Bi-steerable mobile robot in large environments[C]// IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and Their Application to Mechatronics. Liberec: IEEE Press, 2015:611-616. DOI:10. 1109/ECMSM. 2015. 7208683.
- [9] COLAS F, SIEWART R. A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics[M]. Boston: Now Publishers Inc, 2015. DOI:10. 1561/23000000035.
- [10] 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. DOI:10. 1109/34. 121791.
- [11] 胡加涛, 吴晓红, 何小海, 等. 一种基于几何特征由粗到细点云配准算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5):1947-1952.
- [12] LEE D, YUN Y, HWANG Y, *et al.* 2D grid map building using ICP algorithm and line extraction[C]//14th International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul: IEEE Press, 2014:852-855. DOI:10. 1109/ICCAS. 2014. 6987899.
- [13] 祝继华, 郑南宁, 袁择剑, 等. 基于 ICP 算法和粒子滤波的未知环境地图创建[J]. 自动化学报, 2009, 35(8):1107-1113. DOI:10. 3724/SP. J. 1004. 2009. 01107.
- [14] 顾文华, 周波, 戴先中. 基于 ICP 匹配算法的室内移动机器人定位[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(增刊 1):262-266. DOI:10. 13245/j. hust. 2013. s1. 069.
- [15] POMERLEAU F, CLOAS F, SIEGWART R, *et al.* Comparing ICP variants on real-world data sets: Open source library and experimental protocol[J]. Autonomous Robotics, 2013, 34(3):133-148. DOI:10. 1007/s10514-013-9327-2.
- [16] 王君, 高颖慧, 王平, 等. 一种 ICP 改进算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(10):71-76. DOI:10. 3969/j. issn. 1674-8425-B. 2011. 10. 015.
- [17] CENSI A. An ICP variant using a point-to-line metric[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena: IEEE Press, 2008:19-25. DOI:10. 1109/ROBOT. 2008. 4543181.
- [18] 周波, 钱堃, 马旭东, 等. 基于集员估计的室内移动机器人多传感器融合定位[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(4):541-550. DOI:10. 7641/CTA. 2017. 60209.
- [19] GENG Nan, MA Fufeng, YANG Huijun, *et al.* Neighboring constraint-based pairwise point cloud registration algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, 75(24):1-18. DOI:10. 1007/s11042-015-2941-6.
- [20] 杨晶东, 孙磊明, 邵雨婕, 等. 一种有效的自主机器人迭代最近点定位算法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15):15-21. DOI:10. 3901/JME. 2018. 15. 015.
- [21] 伍明. 未知环境下移动机器人目标跟踪理论与方法[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2018.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)