

文章编号 1004-924X(2017)增-0052-08

具有低漂移度的激光雷达同步定位和三维建图

刘立新, 孙 伟*, 汪海潮

(西安电子科技大学 空间科学与技术, 陕西 西安 710118)

摘要: 鉴于传统的 2D 激光雷达在不借助其他传感器的情况下难以实时绘制精细的三维地图, 本文提出以六自由度移动 2D 激光雷达, 通过其在扫描期间感知的点云执行运动估计, 构建扫描环境的三维地图。首先, 以程序开始时雷达所在位置为世界坐标系的原点, 将雷达扫描到的激光点与电机的旋转角度结合, 使激光点带有三维坐标信息, 并注册到激光雷达坐标系中。使用双边滤波算法对雷达坐标系中的点云进行滤波, 然后采用激光雷达测距算法处理点云数据, 计算连续两次扫描之间的运动。估算的运动用于雷达自身的姿态变换和矫正点云失真。激光雷达绘图算法进一步处理矫正后的点云并配准到地图上输出三维点云图, 同时输出雷达的姿态变换。最后整合两种算法的姿态变换, 输出激光雷达在世界坐标系中的位置信息。实验结果表明: 该方法可以使用激光雷达原始数据和电机位置信息实时地精确估计激光雷达以六自由度运动的轨迹, 同时构建高质量的激光雷达三维点云图。提出的方法具有良好的实时性, 室内环境中测试的相对精度约为 2%, 适用于三维地图的在线重建。

关键词: 激光雷达; 三维建图; 同时定位与地图构建; 姿态变换; 双边滤波

中图分类号: V243.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0052

Lidar simultaneous localization and mapping with low-drift

LIU Li-xin, SUN Wei*, WANG Hai-chao

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710118, China)

* Corresponding author, E-mail: wsun@xidian.edu.cn

Abstract: As conventional 2D lidars can't reconstruct three-dimensional map in real time without other sensors, this paper constructed a three-dimensional map from point clouds perceived by a 2D laser lidar scanning in six degrees of freedom. First, the location of radar was taken as the origin of world coordinate system at the beginning of the program. The laser spot scanned by the radar was combined with the rotation angle of the motor so that the laser point has three-dimensional coordinate information, which was registered into the radar coordinate system. The bilateral filtering algorithm was adopted to filter the point cloud, which was then processed by lidar ranging algorithms to calculate the motion of the lidar between two successive scans. The estimated motion was used to correct the distortion of the point cloud. The drawing algorithm further processes the output of the ranging algorithm at a lower frequency, fine-graining the corrected cloud to the map. Finally, the two algorithms were integrated to map and post the radar posture transformation in real time, thus outputting the po-

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No. 61201290); 国家自然科学基金面上项目 (No. 61671356); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No. JB161301, No. JBG161307)

sition of lidar in world coordinate system. Experimental results show that the method can accurately estimate the trajectory of the lidar with six degrees of freedom in real time based on the laser radar original data and the motor position information, and meanwhile construct high-quality 3D point cloud image. The proposed method exhibits good real-time performance, and the relative precision of the indoor test is approximately 2%.

Key words: lidar; three-dimensional mapping; Simultaneous Localization and Mapping(SLAM); posture transform; bilateral filtering

1 引言

激光雷达是近年来发展迅速的新型测绘技术,以高角分辨率、高实时性、强抗干扰能力以及全天候的工作能力广泛应用于遥感、测绘、大气测量等领域中。与视觉里程计相比,激光雷达绘图的主要优势是它对环境光照和场景中的光学纹理不敏感。

在使用激光雷达进行定位和绘图的过程中,当激光雷达的扫描速率远高于其自身运动时,扫描内的运动失真通常可以忽略,在这种情况下,标准的 ICP 算法可以用于匹配不同扫描之间的激光返回。然而,在移动平台上使用激光雷达三维建图是困难的,如果激光雷达的自身运动较快,扫描期间由于雷达运动造成的失真会严重影响建图;因此在构建点云时,必须同步解算扫描期间传感器的运动轨迹,否则点云结构将严重失真并且可能无法识别。J. Hertzberg 等人采用频繁停止平台运动的方法进行固定扫描^[1]。对于大多数的实际应用,这种方法会很大程度地降低效率。另一类减少失真的方法是使用惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)等传感器来提供速度和加速度的测量。例如激光雷达点云可以通过 IMU 集成的视觉光度仪的状态估计来记录。当 GPS/INS 和轮式编码器同时可用时,问题通常由扩展卡尔曼滤波器^[2]或粒子滤波器来解决。M. Bosse 和 R. Zlot 等人采用 IMU 辅助建图的方法^[3-4]。他们的平台由 2D 激光雷达和 IMU 组成,通过手动点击设备进行绘图。运动轨迹通过批处理优化的方法恢复。该方法用于处理在每段扫描之间添加边界约束的分段数据集,IMU 用于记录激光雷达在每段的运动实况。本质上,这种方法需要批量处理来开发高质量的地图,因此不适用于实时建图。

本文提出了一种激光雷达扫描方法,该方法

可以实时地构建高质量的地图而不需要其他传感器辅助。首先将激光雷达原始数据和电机的旋转角度结合,使点云带有坐标信息并注册到激光雷达坐标系中,使用双边滤波算法对雷达坐标系中的点云进行滤波。然后采用激光雷达测距算法处理点云数据,计算两次连续扫描之间的运动。估算运动用于雷达自身的姿态变换和矫正点云的失真;激光雷达绘图算法进一步处理矫正后的点云并配准到地图上输出三维点云图,同时输出雷达的姿态变换。最后整合两种算法的姿态变换,输出激光雷达在世界坐标系中的位置信息。该方法仅利用激光雷达扫描数据即可在线绘制高质量的三维地图,精确地矫正了扫描期间由于雷达自身运动而造成的误差,克服了传统 2D 激光雷达不借助其他传感器难以实时绘制精确的三维地图的缺点。

2 激光雷达运动估计与绘图原理

2.1 双边滤波算法

本文将激光雷达扫描的原始数据和电机的旋转角度结合,使其带有坐标信息,并注册到激光雷达坐标系中。随后使用双边滤波算法^[5]来处理带有坐标的点云数据。

双边滤波算法为每个采样点建立 k -邻域并估算法向量,将该采样点邻域点拟合的平面作为视平面,建立一个双边滤波器,通过双边滤波器进行噪声处理。具体步骤如下:

(1)建立 k -邻域。利用 K-D 树将空间中无规则的点云构建拓扑关系,令点云中扫到的点集合 $Cloud_2 = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} P_i \in R$,对于每一个扫到的点 $P \in Cloud_2$,把与 P 最邻近的 k 个点称为 P 的 k -邻域, k 为实际扫描到的点云数据;

(2)平面拟合。将上一步中扫描点 P 的 k -邻域记为 $k_{(p)}$,使用最小二乘法在邻域 $k_{(p)}$ 上拟合一个切平面,用 $S_{(p)}$ 表示;

(3)估计平面的法向量。使用 k -邻域点拟合过的平面 $S_{(p)}$ 来计算该平面的法向量 n , n 即为平面的法向量估计;

(4)改正各点坐标。 P 点的坐标可由法矢量

$$L = \frac{\sum_{i=1}^k W_c(\|p - p_i\|) W_s(\|\langle p - p_i, n \rangle\|) \langle p - p_i, n \rangle}{\sum_{i=1}^k W_c(\|p - p_i\|) W_s(\|\langle p - p_i, n \rangle\|)} \quad (2)$$

其中: $W_c = e^{-x^2/(2\delta_c^2)}$ 和 $W_s = e^{-x^2/(2\delta_s^2)}$ 分别是高斯滤波系数 δ_c 和 δ_s 对应的高斯核函数^[6], δ_c 为点邻域半径, δ_s 为邻域点的标准偏差。经过双边滤波处理后输出的点云 C_n 小型噪声被纠正,法向量变得更为整齐。

2.2 激光雷达测距算法

2.2.1 提取特征点

测距算法首先从激光点云 C_n 中提取特征点。雷达内部的激光扫描仪的抛描点具有 0.25° 的分辨率,这些点在扫描平面上,然而,当雷达自身以 $180^\circ/\text{s}$ 的角速度旋转同时以 40 Hz 的频率扫描时,与扫描平面垂直方向的分辨率是 $180^\circ/40 = 4.5^\circ$ 。考虑到这一事实,从 C_n 提取的特征点仅使用具有共面几何关系的单次扫描的数据。

这里选择锐利边缘和平面斑块上的特征点。令 α 是 C_n 中的点, M 是由激光雷达在同一次扫描中返回的 α 连续点的集合。定义一个变量 h , 作为基准衡量局部表面平滑度:

$$h = \frac{1}{|M| \cdot \|F_{C_{n,\alpha}}^L\|} \left\| \sum_{i \in M, i \notin \alpha} (F_{C_{n,\alpha}}^L - F_{C_{n,i}}^L) \right\|, \quad (3)$$

式中: $F_{C_{n,\alpha}}^L$ 是上节中点云注册算法输出点云中的点在雷达坐标系中的坐标。基于 h 值对扫描到的点进行排序, h 值最大的是边缘点, h 值最小的是平面点。为了均匀分布特征点,将扫描分为 4 个相同的子区域。每个子区域最多提供 2 个边缘点和 4 个平面点。只有当 h 值是最大或者最小且所在区域选择的点的数量不超过最大值时,点 α 才作为边缘或者平面点。

在选择特征点时,如图 1 所示,当雷达在位置 3 时,扫描射线大致平行于局部平面,那么在这个平面上的点都未被选取^[7],如图 1 中的 C 点。当激光雷达由位置 1 移动到位置 2 时,点 D 为本次扫描中被选取的边缘点。当雷达位于位置 1 时,

与双边滤波算子来确定,即有:

$$P' = P + n \times L, \quad (1)$$

式中: P' 为计算出的点坐标, n 为其对应的法矢量, L 为双边滤波因子;

点 B 为本次扫描的边缘点,但是与其连接的表面被另一个物体遮挡。然而,当激光雷达移动到另一个观察点位置 2 时,可以观察到遮挡区域,虽然这一点是边缘点,但仍将其视为不可靠点而不选为特征点。

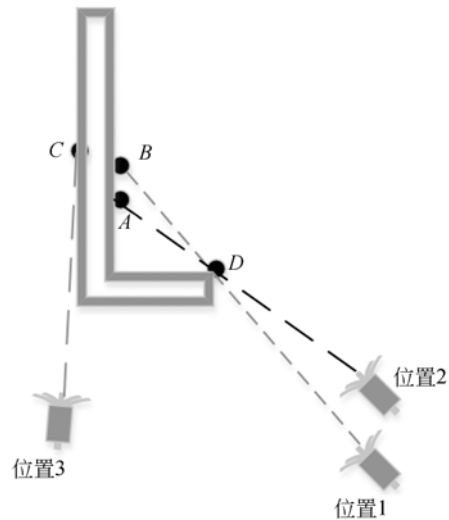


图 1 特征点选取标准示意图

Fig. 1 Selection standard of feature points

2.2.2 寻找对应特征点

令 t_n 为第 n 次扫描开始的时间,在第 $n-1$ 次扫描结束时,扫描期间感知的点云 C_{n-1} 存储到 3D K-D 树中^[8],并且被重新投射到图 2 的时间戳 t_n 处。令投射后的点云为 \bar{C}_{n-1} ,在第 n 次扫描期

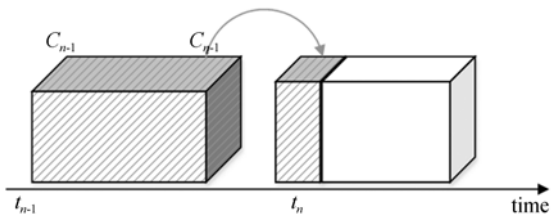


图 2 寻找对应特征点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of corresponding feature points

间, \bar{C}_{n-1} 和 C_n 用来估计激光雷达的运动。

使用上一节讨论的方法,从点云 \bar{C}_{n-1} 和 C_n 找到边缘点和平面点。令 A_n 和 B_n 分别是边缘点和平面点的集合, \bar{C}_{n-1} 中的边缘线对应 A_n 中点,平面斑块对应 B_n 点。这里需要注意的是扫描 k 开始时, C_n 是空集,随着扫描期间接收到的点增加而增加,对于 A_n 和 B_n 中的每一个点,在 \bar{C}_{n-1} 中找到其最邻近点。如图 3(a)所示找到的边缘线作为边缘点的对应关系的过程。令 i 是 A_n 上的点, j 是点云 \bar{C}_{n-1} 中与 i 点的最邻近点, j 和 l 确定一条边缘线,形成 i 的对应关系。这里需要注意的是, j 和 l 必须来自不同的扫描。那么 i 点到边缘

线(j, l)的对应距离由以下表达式求解:

$$dA = \frac{|(\bar{F}_{C_n, i}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, j}^l) \times (\bar{F}_{C_n, i}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, l}^l)|}{|\bar{F}_{C_{n-1}, j}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, l}^l|}, \quad (4)$$

式中: $F_{C_n, i}^l$, $F_{C_{n-1}, j}^l$ 和 $F_{C_{n-1}, l}^l$ 分别是点 i, j 和 l 在雷达坐标系中的坐标。

图 3(b)表示找到的平面斑块作为平面点的对应关系的过程,令 i 为 B_n 中的点, j 是点云 \bar{C}_{n-1} 中与 i 点的最邻近点。然后找到 i 最近的两个连续扫描上的最邻近点 l 和 m 。 j, l 和 m 确定平面斑块,作为 i 点的对应关系。 i 点到平面斑块的距离为:

$$dB = \frac{|(\bar{F}_{C_n, i}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, j}^l) \times ((\bar{F}_{C_{n-1}, j}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, l}^l) \times (\bar{F}_{C_{n-1}, j}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, m}^l))|}{|(\bar{F}_{C_{n-1}, j}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, l}^l) \times (\bar{F}_{C_{n-1}, j}^l - \bar{F}_{C_{n-1}, m}^l)|}, \quad (5)$$

式中: $F_{C_n, i}^l$ 、 $F_{C_{n-1}, j}^l$ 、 $F_{C_{n-1}, m}^l$ 和 $F_{C_{n-1}, l}^l$ 分别是点 i, j, m 和 l 在雷达坐标系中的坐标。

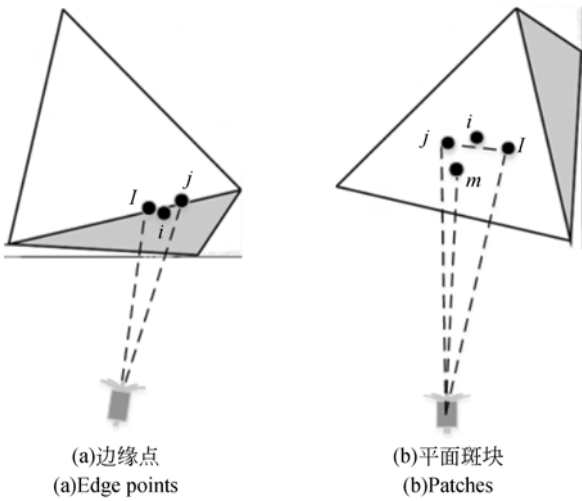


图 3 匹配特征点示意图

Fig. 3 Match of feature points

2.2.3 运动估计

激光雷达自身的运动估计在扫描期间以恒定的角速度和线速度建模,据此,这里可以在扫描中对在不同时刻接收的点的姿态变换进行线性内插。令 t 是当前时刻, t_n 即为扫描 n 开始的时刻。令 $T_n^l(t)$ 为 (t_n, t) 之间的激光雷达姿态变换,包

含了六自由度方向的运动。 $T_n^l(t) = [d_n^l(t), \theta_n^l(t)]^T$, 其中, $d_n^l(t) = [tx, ty, tz]^T$ 分别是沿着激光雷达坐标系的 x 轴, y 轴和 z 轴的平移, $\theta_n^l(t) = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ 是在雷达坐标系中的旋转,坐标系的方向遵循右手规则。与 $\theta_n^l(t)$ 相对应的旋转矩阵可以由 Rodrigues 公式^[9]求解:

$$\mathbf{R}_n^l(t) = e^{\hat{\theta}_n^l(t)} = I + \frac{\hat{\theta}_n^l(t)}{\|\theta_n^l(t)\|} \sin \|\theta_n^l(t)\| + \left[\frac{\hat{\theta}_n^l(t)}{\|\theta_n^l(t)\|} \right]^2 (1 - \cos \|\theta_n^l(t)\|), \quad (6)$$

其中 $\hat{\theta}_n^l(t)$ 是 $\theta_n^l(t)$ 的偏斜对称矩阵。

在点云 C_n 中给定一个点 α , 令 t_α 为扫描到它的时刻, $T_{C_n, \alpha}^l$ 为 (t_n, t_α) 之间的姿态变换,通过线性内插来计算 $T_{C_n, \alpha}^l$, 得到:

$$T_{C_n, \alpha}^l = \frac{t_{C_n, \alpha} - t_n}{t - t_n} T_n^l(t). \quad (7)$$

A_n 和 B_n 是从 C_n 提取的边缘点和平面点的集合,利用式(8)将 A_n 和 B_n 投射到扫描开始,即 \bar{A}_n 和 \bar{B}_n 。

$$\bar{F}_{C_n, \alpha}^l = \mathbf{R}_{C_n, \alpha}^l F_{C_n, \alpha}^l + d_{C_n, \alpha}^l, \quad (8)$$

其中: $F_{C_n, \alpha}^l$ 是 A_n 或 B_n 中的点,而 $\bar{F}_{C_n, \alpha}^l$ 是 \bar{A}_n

或 \bar{B}_n 中的对应点; $\mathbf{R}_{\zeta_{n,\alpha}}^l$ 和 $\mathbf{d}_{\zeta_{n,\alpha}}^l$ 是对应于 $T_{\zeta_{n,\alpha}}^l$ 的旋转矩阵和平移向量, 结合式(4)和式(8)可以得出 A_n 中边缘点与对应的边缘线之间的几何关系:

$$f_A(F_{\zeta_{n,\alpha}}^l, \mathbf{T}_n^l(t)) = d_A, \alpha \in A_n, \quad (9)$$

同理, 结合式(5)和式(8)可以在 B_n 中平面点和相应的平面斑块之间建立另一个几何关系:

$$f_B(F_{\zeta_{n,\alpha}}^l, \mathbf{T}_n^l(t)) = d_B, \alpha \in B_n. \quad (10)$$

最后, 对 A_n 和 B_n 中的每个特征点, 堆叠式(9)和式(10), 得到非线性函数:

$$f(\mathbf{T}_n^l(t)) = d, \quad (11)$$

其中: 每行的 f 对应一个特征点, d 包含对应的距离。计算 f 对应 $\mathbf{T}_n^l(t)$ 的 Jacobian 矩阵, 用 \mathbf{J} 表示, $\mathbf{J} = \partial f / \partial \mathbf{T}_n^l(t)$ 。式(11)即可通过将 d 最小化来进行非线性迭代求解, 即有:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_n^l(t) &\leftarrow \mathbf{T}_n^l(t) - \\ &(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \text{diag}((\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{-1} \mathbf{J}^T d), \end{aligned} \quad (12)$$

式中 λ 是由 Levenberg-Marquardt 方法^[10]确定的因子。

2.3 激光雷达绘图算法

每次扫描绘图算法运行一次, 在 n 次扫描结束时, 激光雷达测距算法输出未失真点云 \bar{C}_n , 同时输出在扫描 t_n 到 t_{n+1} 期间包含激光雷达运动的姿态变换 $T_{n+1}^l(t_{n+1})$ 。绘图算法在世界坐标系中的配准点云 C_n , 如图 4 所示。

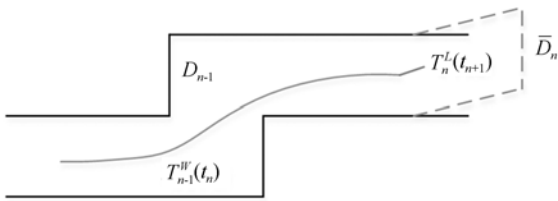


图 4 绘图算法配准点云示意图

Fig. 4 Registration of point cloud by mapping algorithm

这一过程原理如下: 首先令地图上扫描 $n-1$ 次之前的点云为 D_{n-1} , 令 $T_{n-1}^w(t_n)$ 为扫描 $n-1$ 结束时刻 t_n 地图上的激光雷达姿态。利用激光雷达测距算法的输出, 绘图算法将 $T_{n-1}^w(t_n)$ 扩展到 (t_{n-1}, t_n) 的一次扫描, 以获得 $T_n^w(t_{n+1})$, 并将 C_n 转换到世界坐标系中, 用 D_n 表示。绘图算法以与 3.2 节中的相同方式提取特征点, 其目的是匹配 D_{n-1} 与 D_n 中的特征点以配准 D_n 到世界坐

标系中。为了匹配特征点, 在地图上 10 m^3 的立方体区域存储点云 D_{n-1} , 在 D_n 相交的立方体中的点被提取出来并存储到 3D K-D 树中^[11], 在特征点周围的特定区域内找到 D_{n-1} 中的点。令 M' 是 D_n 中点的集合, 对于边缘点, 只在 M' 中的边缘线上保留点; 对于平面点, 只在 M' 的平面斑块上保留点, 然后计算 M' 的协方差矩阵 \mathbf{U} 以及 \mathbf{U} 的特征值 P 和特征向量 \mathbf{Q} 。如果 M' 分布在边缘线上, 那么 P 包含比其他两个大得多的一个特征值, 并且最大特征值的特征向量表示边缘线的方向; 如果 M' 分布在平面斑块上, 那么 P 包含比其他两个小得多的一个特征值, 并且最小特征值的特征向量表示平面斑块的方向。使用式(2)和式(3)来计算特征点到其匹配点的距离, 然后为每个特征点导出一个等式作为式(7)或式(8)。以此解算出平面点与边缘点的对应关系, 进而将 D_n 与 D_{n-1} 配准。

3 激光雷达三维建图实验步骤

本文研究使用的是 Hokuyo UTM-30LX 激光雷达, 分辨率是 0.25° , 视场是 180° , 扫描速率是 40 线/秒。电机型号是 Dynamixel MX-28, 激光雷达刚性连接到电机并以 $180^\circ/\text{s}$ 的角速度面朝前方来回旋转, 同时, 电机的板载编码器以 0.08° 的分辨率传输电机的旋转角度。激光雷达和电机传输的消息通过 USB 传输到笔记本电脑, 测距算法在 Ubuntu14.04 的机器人操作系统 ROS(Indigo)^[12] 上运行。在室内环境中, 测试分为静止不动和以 0.5 m/s 的速度移动实验平台。

如图 5 所示, 激光雷达三维建图步骤如下:

- (1) 激光雷达发布点云原始数据;
- (2) 电机发布旋转角度消息;
- (3) 结合步骤(1)和(2)将激光雷达点云注册到激光雷达坐标系中, 使其成为带有坐标信息的点云;
- (4) 使用双边滤波算法对步骤(3)中的点云进行滤波处理, 输出点云 C_n ;
- (5) 激光雷达测距算法处理 C_n , 计算出两次连续扫描之间雷达的运动, 以大约 10 Hz 的频率输出激光雷达的位姿变换, 1 Hz 的频率输出校正后的点云;
- (6) 激光雷达绘图算法进一步处理校正后的

点云,以 1 Hz 的频率将未失真的点云配准到地图上,输出构建好的三维地图,同时以相同的频率输出雷达的位姿变换;

(7)整合步骤(4)和(5)输出的两种位姿变换,以大约 10 Hz 的频率输出激光雷达在世界坐标系中的位置信息。

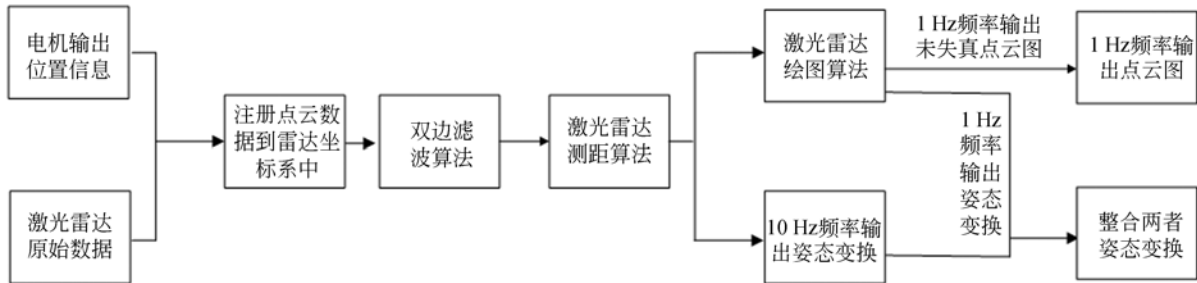


图 5 激光雷达三维建图步骤示意图

Fig. 5 Process of lidar 3D mapping

4 实验结果及分析

为了验证本方法的有效性和可行性,先后在室内环境中以静止不动和 0.5 m/s 的速度对两种场景进行实验,结果分别如图 6 和图 7 所示。

图 6(a)~6(d)为静止不动情况下扫描一个关闭的大门得到的结果,图 6(e)和 6(f)为从相同场景拍摄的两张图片。从图中可以清楚地观察到大门的轮廓,箭头代表估算的位姿变换,在原地理位置漂移距离很少,基本可以忽略。

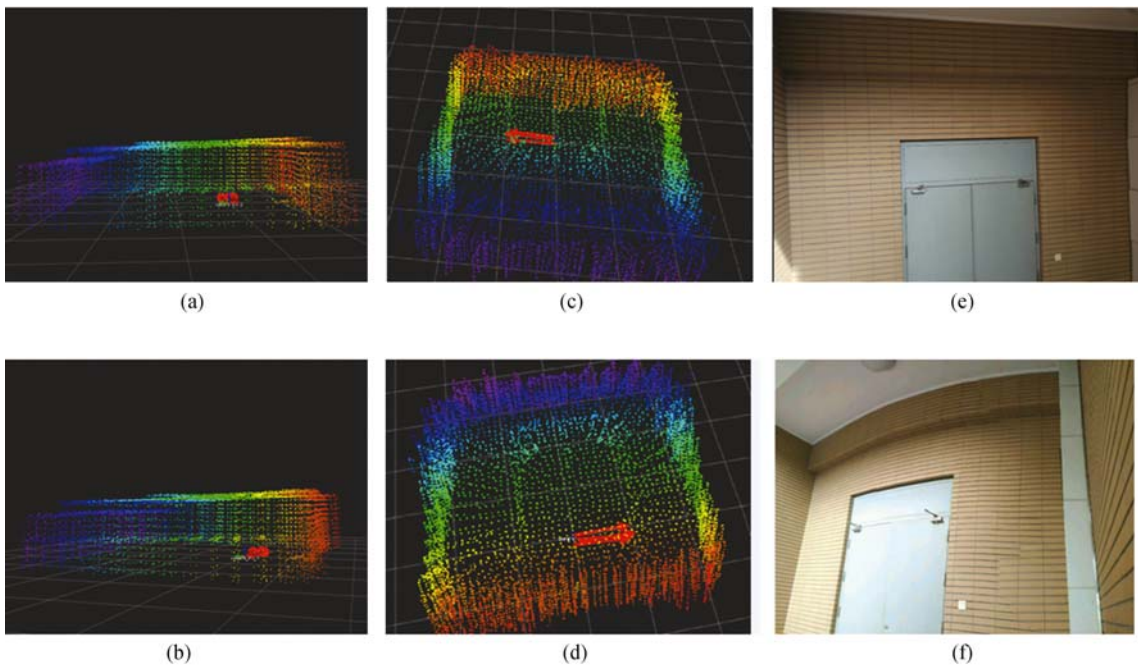


图 6 静止不动时激光雷达三维建图实验结果

Fig. 6 Results of stationary lidar three-dimensional mapping

图 7(a)~7(d)以 0.5 m/s 的速度在走廊中向前直线移动的三维建图,图 7(e)和(h)给出了从相同场景拍摄的两张图片。从图 7(e)和 7(f)

中可以看出左上方的窗户以及窗户后面的窗帘。从图 7(c)可以看出墙上的消防栓。图 7(d)是给激光雷达运动估计的一个特写,可以看到解算的

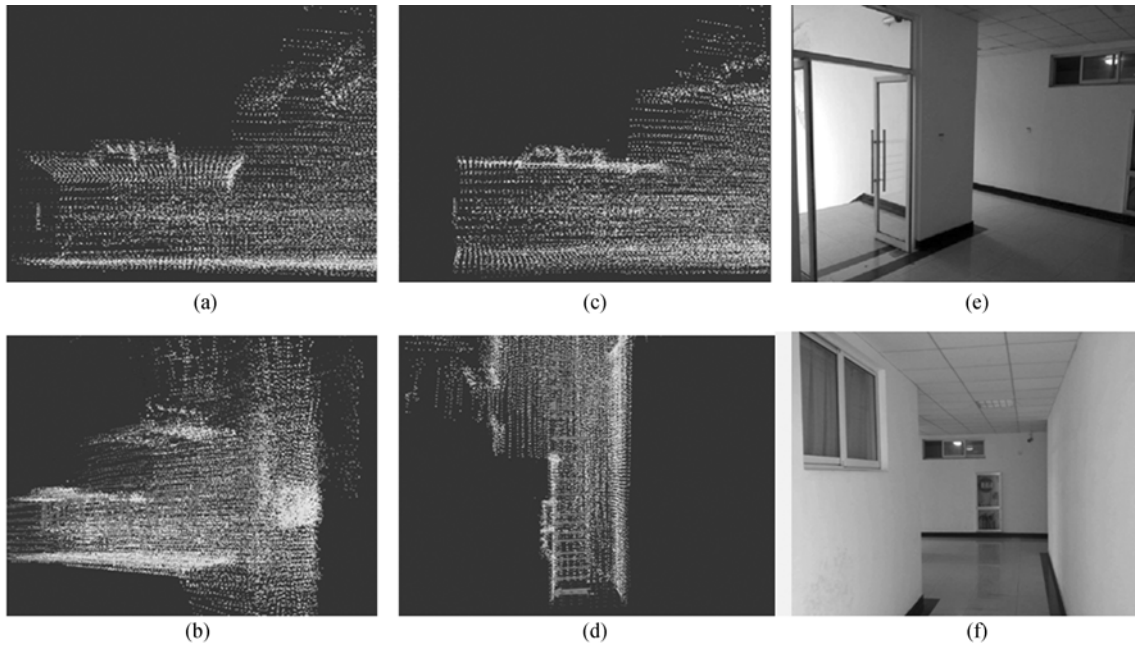


图 7 走廊里向前移动激光雷达三维建图实验结果

Fig. 7 Results of three-dimensional mapping with lidar moving forward in corridor

运动轨迹和实际的运动轨迹基本一致,也可以清楚地观察到对应图 7(e)左边的门框。

利用本文所构建的三维点云图,在 RVIZ 中找到左右墙壁对应的坐标,即可测算出地图中左右墙壁的距离。测量值与真实值的对比如表 1 所示。

表 1 三维点云图中墙壁距离测量值与真实值对比

Tab. 1 Comparison between measured and actual values of wall distance in 3D point cloud

测试场景	测量值/cm	真实值/cm	相对误差/%
大门	163.57	166.50	1.7
走廊	173.75	176.30	1.4

参考文献:

- [1] NUCHTER A, LINGEMANN K, HERTZBERG J, et al.. 6D SLAM-3D mapping outdoor environments [J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 16 (4): 337-340.
- [2] THRUN S, BURGARD W, FOX D. Probabilistic robotics [J]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2005.

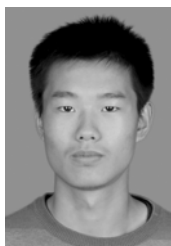
5 结 论

本文提出的方法通过并行运算两种算法来解决激光雷达运动失真导致的点云扭曲。激光雷达测距算法以较高频率粗略估算雷达的运动轨迹,激光雷达绘图算法以较低频率精细地配准点云。这两种算法共同完成实时精确的运动估计与高质量绘图。实验结果表明,该算法可以精确估计激光雷达的运动轨迹,并实时地构建高质量的三维点云图。室内环境中测试的相对精度约为 2%,适用于激光雷达在线地对周围环境三维重建。由于当前方法不包含 IMU 辅助建图,后续研究会使用 IMU 和论文方法结合,进一步减少运动漂移并提高三维建图的精度。

- [3] BOSSE M, ZLOT R, FLICK P. Zebedee: design of a spring-mounted 3-D range sensor with application to mobile mapping [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012 28(5): 1104-1119.
- [4] BOSSE M, ZLOT R, FLICK P. Continuous 3D scan-matching with aspinning 2D laser [C]. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan: 2009.

- [5] 吴祿慎, 史皓良, 陈华伟. 基于特征信息分类的三维点数据去噪[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1465-1473.
WU L SH, SHI H L, CHEN H W. Denoising of three-dimensional point data based on classification of feature information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1465-1473. (in Chinese)
- [6] 张雨禾, 耿国华, 魏潇然. 散乱点云谷脊特征提取[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 310-318.
ZHANG Y H, GENG G H, WEI X R. Valley-ridge feature extraction from point clouds [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 310-318. (in Chinese)
- [7] LI Y, OLSON E. Structure tensors for general purpose LIDAR feature extraction [C]. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011: 9-13.
- [8] DEBERG M, VANKREVELD M, OVERMARS M, *et al.*. Computation geometry: Algorithms and applications [J]. *Berlin: Springer*, 2008.
- [9] MURRAY R, SASTRY S. A mathematical introduction to robotic manipulator [J]. *Boca Raton: CRC Press*, 1994.
- [10] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. *New York: Cambridge University Press*, 2004.
- [11] 王健博, 朱明. 基于字典描述向量的实时图像配准[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1613-1621.
WANG J B, ZHU M. Real time image registration based on dictionary feature descriptor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1613-1621. (in Chinese)
- [12] QUIGLEY M, CONLEY K, GERKEY B. SolarROS: An open-source robot operating system [C]. *ICRA Workshop on Open Source Software*, Kobe, Japan, 2009.

作者简介:



刘立新(1992—),男,河北沧州人,研究方向为激光雷达点云处理和机器人SLAM。E-mail: liulemonlx @ gmail.com

通讯作者:



孙伟(1980—),男,安徽砀山人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为高性能视觉信息计算及嵌入式系统设计。E-mail: wsun@xidian.edu.cn