

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902746

基于点云的复杂环境下楼梯区域识别*

叶一飞 王建中

(北京理工大学 机电学院 北京 100081)

摘 要:自主移动机器人已经在国防军事、灾区救援等领域有了广泛应用,楼梯区域作为一种典型的环境目标,需要机器人能够对其做出准确识别。放置于楼梯区域的障碍物会破坏传统楼梯识别算法需要提取的楼梯平面及边缘特征,导致楼梯区域无法被准确识别。针对该问题,提出了一种复杂环境下,基于点云的楼梯区域检测识别算法。该算法首先使用区域生长方法对目标区域进行分割并通过各区域拟合平面法线方向来选取疑似为楼梯各级竖直阶面的区域;进而对各级楼梯区域进行处理,分割障碍物并获取各级楼梯竖直面上边界;最终根据各级边界位置得到楼梯模型以及障碍物位置。实验结果表明,该算法具有较好的鲁棒性,能在各种复杂环境下识别出楼梯并得到无障碍楼梯区域,构建的楼梯三维模型尺寸误差均小于7%,有较高的准确性,相较于传统楼梯识别算法,能达到更好的检测识别效果。

关键词: 复杂环境;楼梯检测;点云;区域分割

中图分类号: TH39;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

Stair area recognition in complex environment based on point cloud

Ye Yifei Wang Jianzhong

(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Autonomous mobile robots have been widely used in national defense, disaster relief and other fields. As a typical environmental target, the stair area needs to be accurately recognized by the robot. Obstacles placed in the stair area will destroy the stairs' plane and edge features that traditional staircase recognition algorithms need to extract, resulting in the staircase area cannot be accurately recognized. Aiming at this problem, a point cloud-based stair area detection and recognition algorithm in a complex environment is proposed. The algorithm first uses the region growing method to segment the target region and selects the regions suspected to be the vertical step of each level of the stair by fitting the plane normal direction of each region, then processes the each level stair area to segment obstacles and obtain the boundaries on the vertical plane of each level of the stair. Finally, the stair model and obstacle position are obtained according to the boundary position of each level. The experimental results show that the algorithm has better robustness, can recognize stairs in various complex environments and get barrier-free stair area. The constructed 3D model of stairs has a size error of less than 7%, which is higher accuracy. The algorithm can achieve better detection and recognition results compared with traditional stairs recognition algorithms.

Keywords: complex environment; stair detection; point cloud; region segmentation

0 引 言

自主移动机器人正在越来越多的场合发挥重要作用。城市作为机器人工作的主要环境,要求自主移动机

器人,特别是自主越障机器人,能够高效识别典型的环境目标,例如楼梯。当前移动机器人对楼梯目标的识别主要依靠相机或者激光雷达,通过获取楼梯的连续边线特征和连续平面特征来识别楼梯。
利用图像处理识别楼梯具有功耗低,实时性好的特

点,Carbonara 等^[1]通过对图像进行边缘检测并提取平行边缘特征的方法识别楼梯,辅助视障人士了解周围环境。针对边缘检测算法容易受到具有相同平行边缘线特征的环境目标(如斑马线及瓷砖墙面)干扰的特点,Wang 等^[2]在图像处理算法的基础上,结合 RGBD 相机得到的深度信息,进一步对楼梯、斑马线等相似目标进行区分。

基于图像的楼梯识别方法虽然速度较快,但是无法获得楼梯的三维结构信息,例如楼梯的踏步高度和踏步深度以及楼梯与机器人的相对位置。因此自主移动机器人多采用对目标区域点云进行处理的方法,通过平面特征识别楼梯目标并建立三维数学模型以方便机器人爬楼过程。

具体算法流程均是先对环境区域点云信息进行预处理,包括滤波并进行区域分割,然后对分割得到的各个区域平面特征与边界特征进行提取,根据特征信息对目标是否为楼梯进行判定。Castro 等^[3]采用随机采样一致性(RANSAC)算法获得楼梯目标的一组竖直平面,根据这些平面内是否有一组近似的矩形来识别楼梯,进而得到楼梯各级边缘信息并拟合出楼梯目标三维模型。Awwad 等^[4]和 Perez-yus 等^[5]通过改进的 RANSEC 算法使得获取楼梯平面边缘,即各级楼梯分界线的过程更为准确,以此获得更精确的楼梯模型。

当前的楼梯识别算法,特别是基于点云处理的方法已经较为成熟,对于无障碍物干扰的楼梯目标识别准确率较高。但同时该类算法对楼梯特征的约束也较为严格,在检测出目标区域平行平面之后,需要依据平面形状是否为矩形、平面是否有清晰的直线上边界、平面间距是否一致等约束条件来对目标区域是否为楼梯进行判断,如图 1(b)所示。



(a) 有障碍楼梯 (b) 无障碍楼梯
(a) Stair with obstacles (b) Stair without obstacle

图 1 楼梯区域
Fig. 1 Stair area

但是在机器人的实际工作环境中,楼梯区域可能存在障碍物,特别是在复杂的地震救灾环境或者战场侦察环境中,楼梯区域往往都会存在建筑物破损掉落的砖块

碎石等障碍物,如图 1(a)所示。障碍物的竖直表面可能与障碍物下方一级楼梯的竖直面融合成一个整体近似平面,或者单独构成一个与楼梯竖直平面平行的平面。在这种情况下,现有的楼梯识别算法中作为判断依据的平面形状、边界形状、平面间距等特征均被改变,无法满足算法约束条件,导致机器人无法识别出楼梯区域。

为了提升机器人在复杂工作环境中对楼梯的检测识别能力,需要对现有的楼梯识别算法进行一定地改进,主要是对目标区域检测到的平行平面做出有效的分割与筛选,分离障碍物表面与楼梯表面,再对目标进行判断。同时,楼梯区域上放置的障碍物也会阻碍自主移动机器人的正常爬楼过程,这要求机器人在识别出环境中楼梯目标的同时也要得到楼梯上障碍物位置及无障碍物干扰的可通行区域,提前规划爬楼路径以避免障碍物。

本文提出一种基于点云处理的复杂环境下楼梯区域识别算法,通过分割障碍物并筛选出楼梯竖直平面,识别环境中的楼梯目标,并得到机器人可通行的爬楼区域。

1 实验平台及算法总体介绍

本文越障机器人实验平台结构如图 2 所示,通过中心转轴连接翻转摆臂向后旋转带动机器人自身向前翻转,以实现机器人攀爬楼梯等障碍物的功能。机器人依靠安装在车体前部的 D435 深度相机获取环境点云信息,使用 TX2 嵌入式计算机对采集到的环境信息进行处理并驱动行驶电机及翻转舵机。

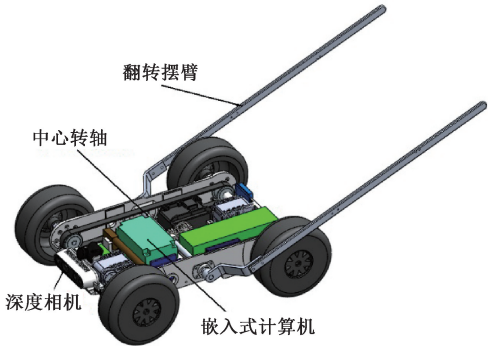


图 2 实验平台机器人结构
Fig. 2 Structure of the robot for experiment

因为该实验平台深度相机平行于水平面安装且相机中心水平面距离地面高度较低,所以机器人在水平面运动时只能观察到前方楼梯的竖直阶面,而不能观察到楼梯的水平阶面。针对这一特点,设计的算法总体流程如图 3 所示。

1) 对得到的环境点云信息进行滤波并降采样。然后

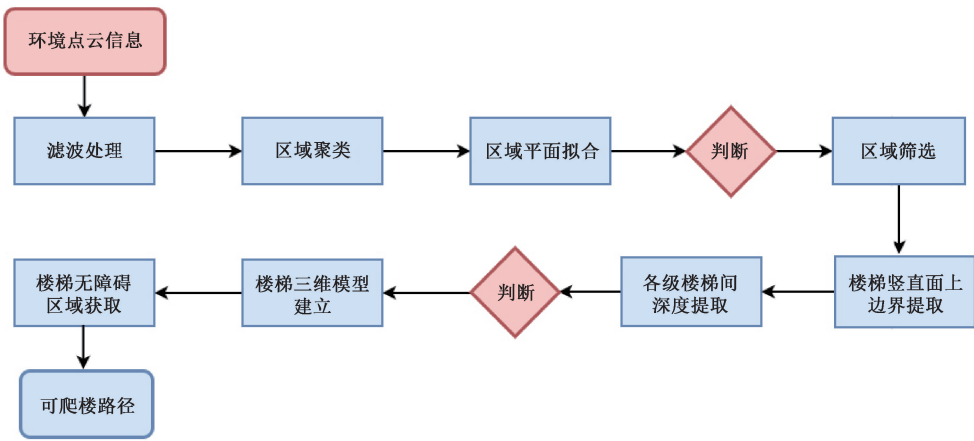


图 3 楼梯检测算法流程
Fig. 3 Process of the stair detection algorithm

基于区域生长算法对目标区域点云进行聚类处理,并对每一个聚类使用 RANSAC 算法得到其拟合平面及平面法线方向,提取拟合平面法向一致的聚类作为疑似各级楼梯竖直面区域。

2) 对每一级疑似区域,尝试分离楼梯与障碍物,得到该级楼梯竖直面边界位置。进而根据各级楼梯竖直面间的深度差和上界高度差,以及第一阶楼梯与机器人的相对距离信息和角度信息拟合出楼梯的三维模型,最终将完整的环境点云信息与三维楼梯数学模型进行拟合,得到无障碍物楼梯区域及机器人可爬楼梯路径。

2 楼梯目标区域提取

2.1 滤波处理

深度相机输出的原始点云数据由于设备精度误差和环境物体间的相互遮挡问题,存在大量离群点需要去除。并且原始数据量过大,需要下采样处理以减少点的数量,进而提高后续处理效率。因此,需要对采集的原始数据进行滤波处理。

由于本文实验平台的相机安装平面离地面高度 τ 很小(约 4.5 cm),可采用直通滤波器去除相机安装平面以下的点云数据,并以相机安装平面作为基准水平面。该近似方法可快速去除地面而保留地面以上的目标点云,但同时会导致第一级楼梯检测高度误差,需要在楼梯模型建立时给予补偿 τ 。另外,如图 4(a) 所示(在本文点云坐标图中,原点位于相机焦点, Y 轴垂直指向地面, Z 轴为相机正对方向),由于楼梯各阶竖直面在相机视野中存在相互遮挡,越靠后的楼梯面被遮挡的越严重,并且随着距离变远,点云信息的精度也随之下降,因此算法仅通过对前几阶楼梯竖直面进行处理,用以判定区域内是否含有楼梯并提取楼梯信息,将 4 m 外点云信息滤除。

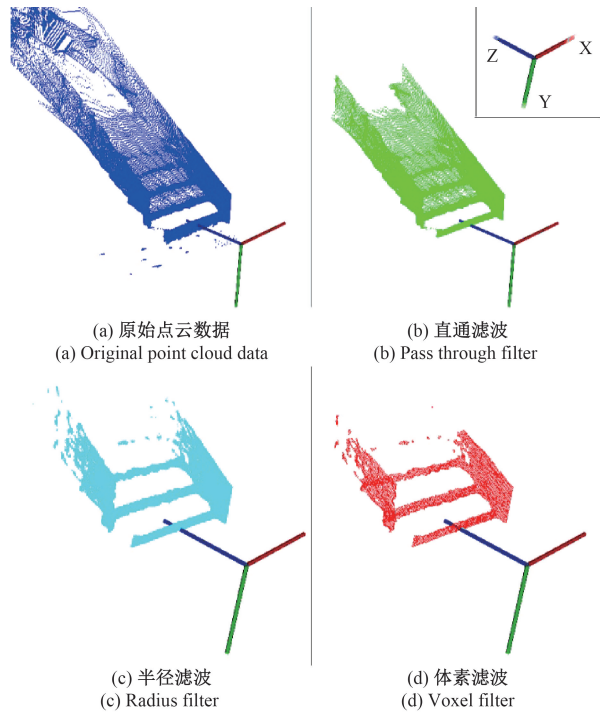


图 4 原始数据及滤波结果
Fig. 4 Original data and filter results

如图 4(b) 所示,直通滤波后的点云由于各级楼梯面间的相互遮挡,仍存在大量离群点,不利于进一步对楼梯面进行聚类处理,需要通过半径滤波器去除离群点并采用体素滤波器在保留点云形状特征的同时减少点的数量以方便后续处理。效果如图 4(c)、(d) 所示。

2.2 区域聚类

对于预处理过后的点云信息,需要进行聚类处理以区分墙面和每一阶楼梯面。常用的点云聚类分割算法包括欧氏聚类和区域生长聚类。欧氏聚类主要依靠空间点

P 与其相邻点间的距离信息作为判断,若距离小于阈值,则将相邻点归于 P 所属的聚类。对于楼梯目标,因为楼梯面与两侧墙面是相连接的,使用基于距离信息的欧氏聚类算法会导致无法分割楼梯阶面与墙面,如图 5(a) 所示。

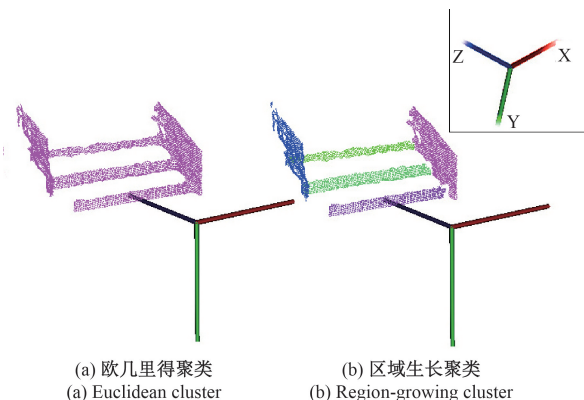


图 5 两种点云聚类方法结果

Fig. 5 The results of two-point cloud clustering methods

对于楼梯面与墙面这种小曲率变化面(基本均为平面)目标,采用基于区域生长的聚类分割算法,效果更好。该算法从一种子点 P 出发,判断其相邻点 P' 的法线方向与种子点的法线方向是否足够接近,若小于平滑阈值,则将 P' 加入 P 所属聚类,若该点曲率值也小于阈值,则将 P' 作为新的种子点继续向外扩展,效果如图 5(b) 所示。因该算法考虑了点的法线方向信息与曲率信息,在处理墙面及与墙面成 90° 相交的楼梯面时能很好地将两侧区域进行划分。

但当楼梯上存在障碍物时,如图 6 所示,该算法会将障碍物与其前一阶楼梯面归为一个聚类,或者直接区分障碍物作为一个单独聚类。

2.3 区域筛选

对目标区域聚类完成后,需要去除墙面以方便后续处理。因墙面与楼梯面均为平面,可对每个聚类内点云使用 RANSAC 算法得到该聚类的拟合平面,近似为该楼梯面或墙面的平面坐标方程。取原点指向平面方向为该平面法线方向,设其与 X 轴正向夹角为 θ 。

由楼梯特征可知,各级楼梯竖直阶面相互平行,其法向 θ 值近似相等,而两侧墙面虽然相互平行,但因为坐标原点即相机位于两侧墙面之间,其法线方向相反,且均与楼梯面法向值存在约 90° 偏差。

根据上述特点,求取所有聚类的,依据是否存在两个及以上(楼梯至少有两级) θ 值相近的聚类来判断目标区域是否可能存在楼梯。

然后计算各聚类的平均深度 $\bar{\theta}$, 残差 v_i , 以及标准偏差 δ 有:

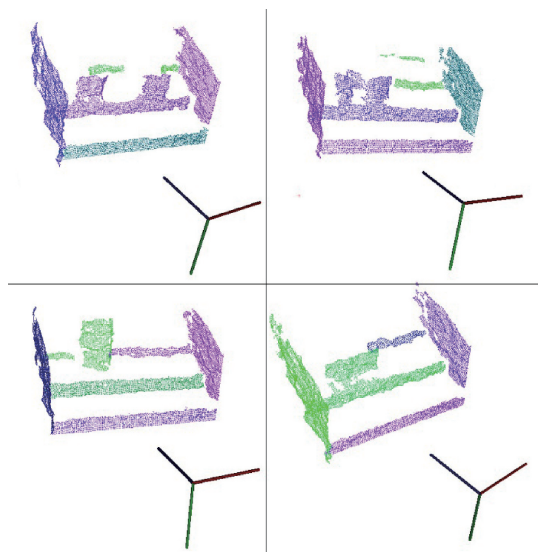


图 6 区域生长算法对存在障碍物楼梯区域的聚类结果

Fig. 6 The results of region-growing algorithm for stair area with obstacles

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta \quad (1)$$

$$v_i = |\bar{\theta} - \theta_i| \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (3)$$

对于残差大于标准偏差的聚类,其必定为墙面目标。将这些的聚类删除,可以得到只包含楼梯目标及楼梯上障碍物目标的点云区域,方便后续处理。至此,算法保留的聚类有如下 3 种类型:

- 1) 仅包含一级楼梯竖直面的点云聚类;
- 2) 仅包含楼梯区域障碍物的点云聚类;
- 3) 同时包含一级楼梯竖直面和位于该级楼梯上的障碍物的点云聚类。

3 楼梯模型建立及无障碍楼梯区域提取

3.1 楼梯竖直阶面上边界提取

算法对目标区域点云进行聚类处理并筛选后,得到了可能为楼梯各级竖直面的点云区域。因为楼梯面间的相互遮挡,这些竖直面的下边界位置往往位于视野盲区,如图 7 所示,只能依靠各级竖直面的上边界位置间的高度差和深度差来求取每一级楼梯的高度 h 和深度 d 。

当楼梯区域不存在障碍物时,如图 7 所示,各级楼梯竖直面上界位置清晰,楼梯三维特征参数易求得。重点是当该区域存在障碍物干扰时,如图 6 所示,如何去除仅含有障碍物的聚类,并在同时包含有楼梯面与障碍物的聚类中分离出障碍物,得到该聚类中楼梯面的上边界

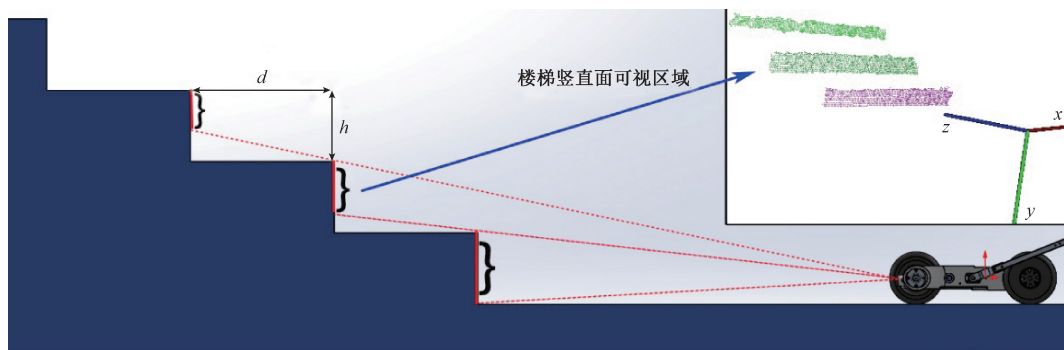


图 7 楼梯竖直面间的视野遮挡及可视区域

Fig. 7 Visual field occlusion and visible areas between vertical surfaces of stairs

位置。

首先,对前章筛选后得到的所有聚类按照包含楼梯面进行处理(包括只含有障碍物的聚类),尝试提取该聚类内疑似楼梯竖面上界的位置。

对每一个聚类,先遍历聚类内所有点,得到该聚类内点的最大 Y 轴坐标值 y_l , 对应该聚类内最低点的高度位置(Y 轴正向垂直指向地面)。设置一初始构造平面:

$$\varphi_0: y = y_l \quad (4)$$

然后求取聚类内与初始构造平面距离 $l \leq 0.01 \text{ m}$ 的点的个数 n_0 , 记为 y_0 位置构造平面的内点数。然后将初始构造平面 φ_0 沿坐标轴 Y 轴负向移动(提升构造平面高度,每次提升 0.01 m),并持续记录与构造平面距离小于阈值的点的个数。

对于无障碍物干扰的聚类,如图 8(b)所示,在平面 φ 由聚类的高度最低点向最高点移动过程中,内点数 n 随构造平面的 y 值变化而变化。设楼梯竖面上界位置 y_m , 则对于构造平面 $\varphi: y \in (y_m, y_l)$, 其内点数 n 的值将近似不变。当构造平面位于楼梯竖面上边界高度,即 $\varphi_m: y = y_m$ 时,内点数 n 将突然下降,理想情况下,变化量 Δn 约等于最大内点数的 $1/2$ 。因为此时,位于该构造平面上方 0.01 m 范围内的点云数量将近似为 0。然后继续移动构造平面,内点数会继续跳变减少,变化量 Δn 仍然近似等于最大内点数的 $1/2$, 因为此时构造平面下方 0.01 m 范围内也没有点。

当存在障碍物干扰时,如图 8(a)所示。对于构造平面 $\varphi: y \in (y_m, y_l)$, 其内点数 n 的值近似不变。当构造平面与楼梯竖面上边界在同一高度,即 $\varphi_m: y = y_m$ 时,因为障碍物的存在,此时构造平面上方阈值范围内仍有部分点云,内点数 n 在此高度的突变量与障碍物的宽度有关,障碍物宽度占据楼梯区域总宽度的比例越大,内点数的突变量越小。在极端情况下,障碍物横跨整个楼梯区域,此时内点数几乎不存在突变量。

考虑到本文楼梯识别算法的最终目的是为了自主移动机器人能够寻找无障碍的爬楼路径。如若障碍物尺

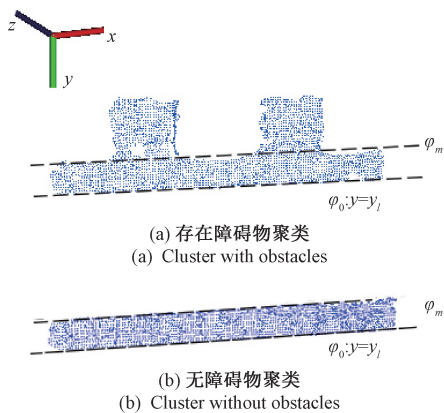


图 8 点云聚类及其构造平面

Fig. 8 Point cloud clusters and construction planes

寸过宽,近乎横向覆盖了整个楼梯区域,则对于机器人,无障碍的爬楼路径不存在,可直接将整个目标区域作为非可行路径处理。因此,本文不考虑该极端情况,仅对存在一定宽度无障碍路径的楼梯区域进行分析。

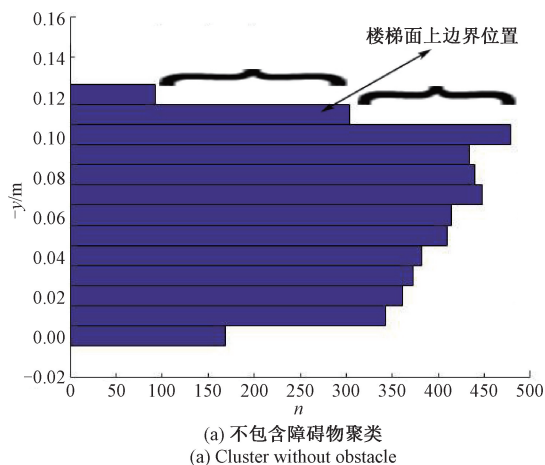
综上所述,对于楼梯区域的每一个单独聚类,均可对其采用下述算法求取每一个疑似楼梯竖面上边界位置。

- 1) 初始化并沿 Y 轴负方向移动构造平面。
- 2) 求取不同高度位置构造平面对应的内点个数 n 。
- 3) 对内点数 n 的变化值进行分析,寻找最先出现连续两次内点数突然减少的位置,减少量 Δn 与最大内点数 $n_{\max}$ 的比值应大于给定阈值。
- 4) 在步骤 3) 所得结果中,第 1 次发生内点数跳变的构造平面高度位置即为该聚类内楼梯竖面上边界位置。

5) 记录每个聚类内所得到的上边界位置(记作 Y)、初始构造平面位置(记作 y)以及该聚类的拟合平面到坐标原点的距离(记作 s)。

对于图 8 所示的两种聚类,都使用上述算法进行处

理,结果如图9所示,均可以找到该级楼梯面的上边界位置。至此,算法已完成了对所有包含楼梯竖直面聚类的



处理。后续需要去除仅包含障碍物的聚类以得到楼梯模型。

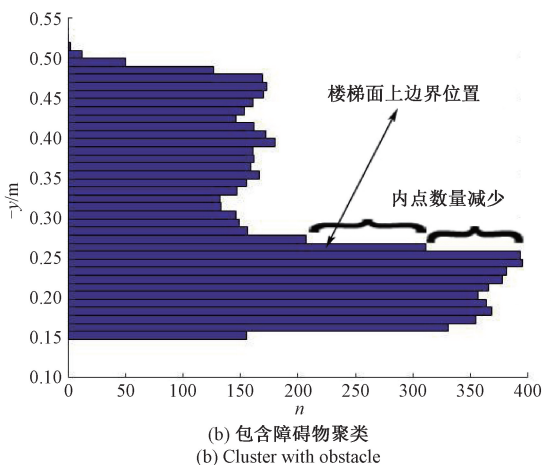


图9 各高度位置构造平面内点数直方图

Fig. 9 Histograms of the inside points' numbers in different heights

3.2 楼梯模型建立

经过楼梯上边界寻找算法的处理,对于每一个聚类,都可以获得一组描述其疑似楼梯上边界三维特征的参数 $V[Y, y, s]$ 。 Y 表示该聚类内楼梯上边界位置的 Y 轴坐标值, y 表示聚类高度最低点 Y 轴坐标值, s 表示该聚类内楼梯竖直面与原点的距离。

由于3.1节将仅包含障碍物的聚类也当做目标进行了处理,所以在构建楼梯模型前需要将该聚类的 V 剔除。

首先,将各个聚类的参数 V_i 按照 s 由小到大(即按照楼梯级数由低到高)进行排序。对于楼梯竖直面,由于图7所示的视野遮挡效果,其参数 V_i 必有如下约束条件:

$$y_{i+1} < Y_i < y_i \quad (5)$$

如果不存在只包含障碍物的聚类,如图10所示,各聚类的参数 V_i 均满足约束。

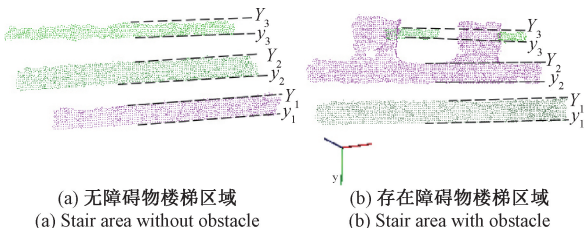


图10 楼梯竖直面特征约束

Fig. 10 Feature constraints of the stair's vertical surface

如果存在仅包含有障碍物的聚类,如图11所示。对于该障碍物聚类,一定有 $Y_i < y_{i+1}$ (在图11中 $Y_3 < y_4$), 不满足楼梯目标的约束条件。将其剔除,剩余聚类的参数 V_i 将满足楼梯面约束条件。

经过上述步骤,算法剔除了仅包含有障碍物的聚类,

并得到了各级楼梯竖直面的上边界位置。对于第1级楼梯竖直面,其高度如下:

$$h_1 = |Y_1| + \tau \quad (6)$$

其中,参数 τ 在3.1节做了解释,为点云坐标系基准水平面距离地面高度。对于第 i ($i > 1$) 级楼梯,其高度和深度有:

$$h_i = |Y_i - Y_{i-1}| \quad (7)$$

$$d_i = |s_{i+1} - s_i| \quad (8)$$

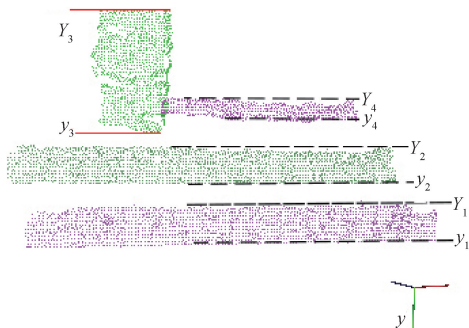


图11 只包含障碍物的聚类特征

Fig. 11 Feature of the cluster only have obstacles

在构建楼梯模型之前,再次对目标进行判断。因为对于一个楼梯目标,其各级竖直面的高度和相对深度应为常数,即应有约束条件:

$$h_i \approx h = \frac{1}{n} \sum_i h_i, i \in [1, n] \quad (9)$$

$$d_i \approx d = \frac{1}{n-1} \sum_i d_i, i \in [2, n] \quad (10)$$

若满足上述约束条件,算法可最终确定目标为楼梯区域,进行下一步,构建楼梯三维模型。去除仅含障碍物

的聚类,可以求得剩余聚类各自拟合平面的法向与 x 轴正向夹角 θ 的平均值 $\bar{\theta}$ 作为楼梯延伸方向:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta \quad (11)$$

对于前三级楼梯,用其各自竖直阶面的平面方程和 y 轴上下边界范围来表示楼梯模型,第 i 级楼梯模型为:

$$\begin{cases} \cos\bar{\theta}x + \sin\bar{\theta}z - s_1 - (i-1)d = 0 \\ (\tau - ih) \leq y \leq (\tau - ih + h) \\ i \in [1, 3] \end{cases} \quad (12)$$

对于三级之后的楼梯目标,因为楼梯竖直面被严重遮挡,初始点云中的大量离群点不易滤除,如图 4(a) 所示,但可将其视为一倾斜平面处理。因此,采用多级楼梯竖直面上下边界线拟合出的倾斜面表示楼梯模型,有:

$$\begin{cases} Ax + By + Cz + D = 0 \\ A = h/\tan\bar{\theta} \\ B = d/\sin\bar{\theta} \\ C = h \\ D = (hd - \tau d - hs_1)\sin\bar{\theta} \\ y \leq \tau - 3h \end{cases} \quad (13)$$

3.3 无障碍楼梯区域

经过 3.2 节的处理,算法识别出目标区域的楼梯并建立了其三维数学模型。将初始点云数据与得到的楼梯面数学模型进行拟合,可以分离出楼梯上的障碍物并得到无障碍的楼梯区域,如图 12 蓝色区域所示(红色区域为障碍物及楼梯两侧墙面)。之后依据无障碍楼梯区域的宽度是否大于自主移动机器人爬楼所需的安全宽度,为自主移动机器人选取出可通行的爬楼路径,具体规划细节不是本文重点,在此不予以详细阐述。

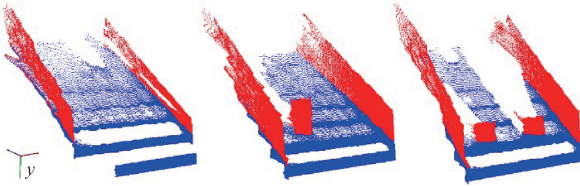


图 12 无障碍楼梯区域提取

Fig. 12 Extract the stair area without obstacles

4 实验结果分析

本文采用翻转越障机器人作为实验移动平台,深度相机 D435 作为环境点云的采集装置,NVIDIA Jetson TX2 嵌入式计算机用作数据处理。

本实验选取的楼梯目标为室内楼梯,1 号楼梯有 8 级台阶,2 号楼梯有 13 级台阶,每级台阶的踏步高度均为 15 cm,踏步深度均为 30 cm。楼梯区域障碍物摆放位

置分为 3 种,楼梯仅前三级台阶上有障碍物(实验 1-1、2-1);楼梯前三级及三级之后台阶上都存在障碍物(实验 1-2、2-2);楼梯前三级台阶上无障碍物(实验 1-3、2-3)。另外选取不同尺寸、形状的障碍物进行测试(实验 3-1、3-2、3-3)。

前三级竖直楼梯面的平面方程加上三级之后楼梯竖直面上下边界整体拟合斜面方程构建的楼梯模型理论上更为精确,实验结果效果最佳。但为了验证本文算法的鲁棒性,在此仅使用楼梯各级竖直面上下边界的整体拟合斜面方程来表示整个楼梯模型,并用该简化模型提取无障碍通行区域。实验结果如图 13、14 及表 1 所示。

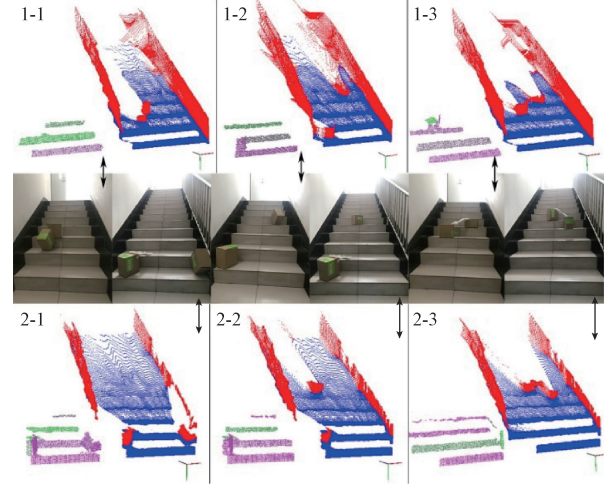


图 13 存在随机摆放障碍物的楼梯区域处理结果

Fig. 13 Processing results with obstacles in random location

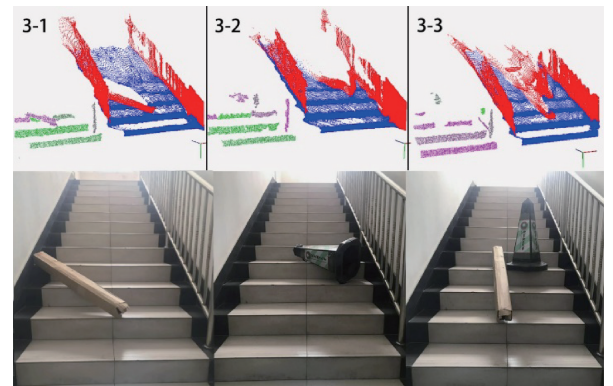


图 14 存在不同尺寸形状障碍物的楼梯区域处理结果

Fig. 14 Processing results with different obstacles

由实验结果可以看出,针对随机放置有不同尺寸、形状障碍物的楼梯区域,该算法均能正确识别楼梯目标并得到楼梯的三维特征参数:单级楼梯的踏步高度和踏步深度。对于单帧处理结果,如表 1 所示,踏步高度误差值 < 1 cm,踏步深度误差值 < 2 cm,测量误差均小于 7%,有较高的准确性。

表 1 不同情况下楼梯模型参数提取结果

Fig. 1 Results of the stair model parameters extraction in different situations

编号	h_1	h_2	h_3	h_4	平均级高/cm	d_2	d_3	d_4	平均级深/cm
1-1	14.605 0	14.311 5	15.899 2		14.938 6	31.220 2	31.227 0		31.223 6
1-2	14.602 1	14.949 6	15.505 8		15.019 2	30.820 7	31.790 0		31.305 4
1-3	14.602 3	15.184 8	15.247 3		15.011 5	31.285 8	30.916 0		31.100 9
2-1	15.788 9	15.438 3	15.440 6	14.868 0	15.384 0	29.012 7	31.307 7	29.668 0	29.996 1
2-2	15.574 9	15.572 1	15.317 2	15.672 7	15.534 2	30.007 6	31.085 6	31.951 0	31.014 7
2-3	15.567 3	15.278 8	15.472 9	15.221 3	15.385 1	30.751 6	31.254 2	32.314 0	31.439 9
3-1	15.114 4	14.501 9	14.886 8		14.834 4	31.599 1	31.243 0		31.371 0
3-2	15.133 5	13.685 3	13.739 4		14.186 6	30.990 2	29.525 0		30.257 6
3-3	15.106 3	14.697 3	14.478 1	15.417 2	14.924 7	31.513 0	33.105 2	30.778 0	31.798 7

另外,从实验结果图 13、14 可以看到,障碍物对后续楼梯目标的视野遮挡效果会根据实验移动平台与楼梯的相对角度位置改变而改变,单个观测角度的处理结果可能无法表示完整的楼梯区域信息。

因此,该算法的一个改进方向是在单帧点云数据处理结果识别出楼梯目标并获取楼梯方位的前提下,移动机器人,改变机器人与楼梯的相对位置,将多个观测角度的处理数据进行融合。得到更为准确的楼梯三维模型以及障碍物信息,从而获得较为完整的无障碍物楼梯区域,方便自主移动机器人后续爬楼梯路径规划。

5 结 论

本文提出了一种基于点云处理的复杂环境下楼梯目标识别算法,能够让自主移动机器人识别出存在障碍物干扰的楼梯目标,构建出楼梯三维数学模型并找到无障碍通行路径。实验结果表明,该算法具有良好的鲁棒性,针对随机放置有不同形状尺寸障碍物的楼梯目标,均能准确分离障碍物与楼梯面,得到无障碍楼梯区域。本文算法在一定程度上去除了传统楼梯检测识别算法的应用场景局限性,更加适合灾区救援、战场侦察等具体工作环境。结合多帧数据处理结果融合的方法,该算法将具有更好的实用性。另外,本文虽基于翻转越障机器人实验平台,但核心算法思想可适用于其他地面移动机器人(例如履带式越障机器人),具有较好的通用性。

参考文献

[1] CARBONARA S, GUARAGNELLA C. Efficient stairs detection algorithm Assisted navigation for vision impaired people [C]. 2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) Proceedings, IEEE, 2014: 313-318.

[2] WANG S, PAN H, ZHANG C, et al. RGB-D image-

based detection of stairs, pedestrian crosswalks and traffic signs [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(2): 263-272.

[3] CASTRO A L F, DE BRITO Y B, DE SOUTO L A V, et al. A novel approach for natural landmarks identification using RGB-D sensors [C]. 2016 International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), IEEE, 2016: 193-198.

[4] AWWAD T M, ZHU Q, DU Z, et al. An improved segmentation approach for planar surfaces from unstructured 3D point clouds [J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(129): 5-23.

[5] PEREZ-YUS A, LOPEZ-NICOLAS G, GUERRERO J J. Detection and modelling of staircases using a wearable depth sensor [C]. European Conference on Computer Vision, 2014: 449-463.

[6] 丛杨, 郑群辉, 唐延东. 基于立体视觉的移动机器人楼梯识别 [J]. 2008 中国仪器仪表与测控技术进展大会, 2008.

CONG Y, ZHENG Q, TANG Y. autonomous stairways detection for UGV based on stereo vision [C]. 2008 China Instrumentation and Measurement and Control Technology Progress Conference, 2008.

[7] 周杨. 基于视觉的楼梯检测与定位 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

ZHOU Y. Detection and location of stair-cases via vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[8] 高瑞. 基于图像特征的楼梯检测算法研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2017.

GAO R. Study on stair detection algorithm based on image feature [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.

[9] 于苏洋, 王挺, 王志东, 等. 基于倾翻与滑移稳定性准则的轮椅机器人爬楼梯控制方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 676-684.

YU S Y, WANG T, WANG ZH D, et al. Stair-climbing

- control method of a wheelchair robot based on tip-over and slippage stability criterion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 676-684.
- [10] 赵吉宾, 刘伟军, 孙玉文. 一种自由曲面点云边界的快速直接提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1269-1273.
ZHAO J B, LIU W J, SUN Y W. Method for direct extraction of boundary from point clouds of freeform surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1269-1273.
- [11] HARMS H, REHDER E, SCHWARZE T, et al. Detection of ascending stairs using stereo vision [C]. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015: 2496-2502.
- [12] LUO R C, HSIAO M, LIU C W. Multisensor integrated stair recognition and parameters measurement system for dynamic stair climbing robots [C]. 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), IEEE, 2013: 318-323.
- [13] LIU M. Robotic online path planning on point cloud[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(5): 1217-1228.
- [14] WESTFECHTEL T, OHNO K, MERTSHING B, et al. 3D graph based stairway detection and localization for mobile robots [C]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2016: 473-479.
- [15] 李世雄, 曹广忠, 李庆, 等. 基于锚点的边缘检测优化算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 9-16.
LI SH X, CAO G ZH, LI Q, et al. Research on anchor points based edge detection optimization [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 9-16.
- [16] 余洪山, 付强, 孙健, 等. 面向室内移动机器人的改进 3D-NDT 点云配准算法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 151-161.
YU H SH, FU Q, SUN J, et al. Improved 3D-NDT point cloud registration algorithm for indoor mobile robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 151-161.
- [17] SINHA A, PAPADAKIS P, ELARA M R. A staircase detection method for 3D point clouds [C]. 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), IEEE, 2014: 652-656.
- [18] YANG M Y, FORSTNER W. Plane detection in point cloud data [C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Control Guidance, 2010(1): 95-104.
- [19] DELMERICO J A, BARAN D, DAVID P, et al. Ascending stairway modeling from dense depth imagery for traversability analysis [C]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2013: 2283-2290.
- [20] OBWALD S, GUTMANN J S, HORNUNG A, et al. From 3D point clouds to climbing stairs: A comparison of plane segmentation approaches for humanoids [C]. 2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, IEEE, 2011: 93-98.
- [21] PRADEEP V, MEDIONI G, WEILAND J. Piecewise planar modeling for step detection using stereo vision [C]. ECCV, 2008.
- [22] PEREZ-YUS A, GUTIERREZ-GOMEZ D, LOPEZ-NICOLAS G, et al. Stairs detection with odometry-aided traversal from a wearable RGB-D camera [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2017(154): 192-205.
- [23] SOUTO L, CASTRO A, GONCALVES L, et al. Stairs and doors recognition as natural landmarks based on clouds of 3D edge-points from RGB-D sensors for mobile robot localization [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1824.
- [24] MURAKAMI S, SHIMAKAWA M, KIVOTA K, et al. Study on stairs detection using RGB-depth images [C]. 2014 Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), IEEE, 2014: 1186-1191.
- [25] CONG Y, LI X, LIU J, et al. A stairway detection algorithm based on vision for ugv stair climbing [C]. 2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, IEEE, 2008: 1806-1811.
- [26] MIHANKHAH E, KALANTARI A, ABOOSAEEDAN E, et al. Autonomous staircase detection and stair climbing for a tracked mobile robot using fuzzy controller [C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, 2009: 1980-1985.

作者简介



叶一飞, 2013 年于北京理工大学获得学士学位, 现为北京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为地面移动机器人结构设计、环境感知与运动控制。

E-mail: yeyifei_bit@163.com

Ye Yifei received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2013. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research interests include structural design, environmental awareness and moving control of the Ground mobile robot.



王建中(通信作者),1984 年于南京理工大学获得学士学位,1987 年于南京理工大学获得硕士学位,1990 年于南京理工大学获得博士学位,现为北京理工大学教授,主要研究方向为智能无人系统技术。

E-mail:cwjzwang@bit.edu.cn

Wang Jianzhong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1984, M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1987, and Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1990. Now he is a professor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include intelligent unmanned system technology.

是德科技发布增强型 UXR 示波器,用于加速开发新一代毫米波通信和应用 价格适中,快速灵活,支持高达 110 GHz 的宽带分析

是德科技公司(NYSE:KEYS)日前宣布,推出一款经济高效、性能灵活的单通道示波器,旨在加速开发新一代的毫米波通信、卫星通信和雷达应用。是德科技是一家领先的技术公司,致力于帮助企业、服务提供商和政府客户加速创新,创造一个安全互联的世界。

UXR0051AP 为是德科技最新型号的 UXR 系列示波器产品。该产品具有 110 GHz 的频率范围和 5 GHz 标准分析带宽,能够经济高效、快速灵活地执行宽带测量分析。是德科技的 UXR 系列示波器可以选配毫米波宽带分析选件,从而将时域信号分析、频谱分析和数字解调功能综合到一台仪器中,实现了出色的信号完整性和丰富的功能,而且价格适中,性能卓越。

加州大学圣地亚哥分校杰出教授、美国国家科学院院士 Gabriel M. Rebeiz 博士表示:“是德科技的 UXR 系列性能卓著,可以轻松、精确地分析毫米波 1×1 和 2×2 MIMO 5G NR 通信链路。即使是在-40 dBm 的输入功率和 67 GHz 的频率内,它在测量 200 MHz 至 5 GHz 带宽的信号时也具有非常低的误差矢量幅度(EVM)(0.2-0.9%)。我们无需使用任何外部放大器或滤波器,即可将 5G 相控阵连接到 UXR,然后运行 89600 VSA 软件开始测量分析。它把我们的测量时间从几个小时缩短到了几分钟。很难想象,如果没有是德科技的 UXR,当今先进的 5G 实验室将如何运作。”