

基于扫描激光的室外移动机器人三维环境建模

钱 来,周 波,戴先中

(东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室,江苏 南京 210096;
东南大学 自动化学院,江苏 南京 210096)

摘 要:针对室外未知的非结构化的三维地形环境,研究基于安装在室外移动机器人平台上的扫描激光对地形环境模型进行构建。采用里程计和GPS的信息对移动机器人平台进行融合定位,并结合机器人的位姿信息将扫描激光的数据转化为点云信息。采用多模板的中值滤波实现对点云中因混合像素干扰等原因造成的孤立点进行滤波,并将扫描的地形环境构建为基于八叉树的空间三维环境描述。文中对校园环境进行扫描实验,实验结果表明该方法可以对未知的三维环境进行准确地描述,同时可大大节省点云数据的存储空间。

关键词:激光扫描;地形建模;八叉树;混合像素干扰

中图分类号:TP391;TH166

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)10-0006-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.10.002

3D Environment Modeling of Outdoor Mobile Robot Based on Scanning Laser

QIAN Lai,ZHOU Bo,DAI Xian-zhong

(Ministry of Education Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Engineering System,
Southeast University,Nanjing 210096,China;
College of Automation,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract:For unstructured outdoor unknown three-dimensional terrain environment,research scanning laser installed in the outdoor mobile robot platform to construct terrain model. Use odometer and GPS for information fusion location of the mobile robot platform,combined robot pose translate scanning laser point cloud into information. Median filtering of multi-template is applied to achieve the outlier point filtering caused by mixed pixels interference in cloud,and scanning the terrain environment is built as octree space-based three-dimensional environment description. Campus environment scan experimental results show that the method can be carried out on the unknown of three-dimensional environment with an accurate description of point cloud data storage space,at the same time greatly save the storage space for point cloud data.

Key words:laser scanning;terrain modeling;octree;hybrid pixel interference

0 引 言

随着科学技术的发展,人类的研究和活动领域已由陆地扩展到深海和太空。野外移动机器人被广泛应用于星球探索、极地考察、军事侦察与对抗、矿藏探测、灾难现场搜索救援、反恐排爆等行业^[1-3]。如何对机器人周围的未知环境进行建模是移动机器人完成任务的基础和前提。

野外移动机器人对周围环境的检测和感知通常采

用的方法有:摄像头、声纳、激光等。其中摄像头可以采集到机器人周围的图像信息,但是对周围环境要求较高,不适合在复杂的环境下进行地形建模,而且摄像头只能得到基本的图像信息,并不能得出空间深度信息;声纳虽然可以得到空间的深度信息,但是其方向性太差,而且检测距离较短,因而不适合野外移动机器人的3D地形建模;激光具有良好的方向性和干扰性,可以在复杂的环境下对地形进行采样,而且可以获得较

收稿日期:2012-12-10

修回日期:2013-03-12

网络出版时间:2013-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6208000008)

作者简介:钱 来(1987-),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为移动机器人;戴先中,博士,教授,博士生导师,研究方向为机器人控制、神经网络软测量与控制等。

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130509.1100.051.html>

好的 3D 信息,因此基于激光扫描的移动机器人 3D 地形建模在各领域都有越来越广泛的应用。

基于激光的地形建模通常采用的有点云图(Point cloudmap)、高程图(Elevation map)、八叉树地形(OCTOMAP),其中点云图是基于激光传感器采集数据对于空间的最直接的描述,该方法是用激光的反射点的位置来表示该空间是否被占有,进而描绘出空间的点云图^[4-5]。该方法可以简明直接地表述空间的基本信息,但是它只能表示激光发射的点的位置,随着扫描范围的增大,其数据量也呈线性增长,数据的存储也将占据大量的空间,限制了该方法的使用。高程地图采用 2 维的网格(cell)来表示平面位置,每个网格存储一个能够代表该网格地形高度信息的高程值,从而构成了对空间的描述,因此又被称为 2.5 维地图。但是该方法只能适合于不存在多层信息的环境,对于存在多层信息的地形环境(例如桥梁、山洞等)则不能进行描述^[6-8]。OCTOMAP 不仅可以表示完整的 3D 地形信息,而且可以描述未知区域的信息,在考虑到激光数据误差的基础上占用最少的数据存储空间^[9-10]。

文中以野外履带式移动机器人平台,采用 SICK 公司生产的二维激光测量系统 LMS291, LMS291 固定在一个高精度转动云台进行障碍检测,通过云台的俯仰与水平的转动激光对周围非结构化的三维环境进行扫描感知,获取周围环境的信息。并设计实验对校园的地理信息环境进行采集,采用里程计和 GPS 进行融合定位,对采集的激光点云的数据信息进行滤波处理,滤除采样中的孤立点和混合像素干扰,最终采用八叉树的形式进行存储,大大节省存储空间,并构建出环境的 3D 模型。

1 定位和信息融合

1.1 移动机器人的定位

机器人的定位是信息采集和融合的基础,对构建地形模型的效果有重要影响。通常采用的定位方式是基于里程计的定位。里程计是依据机器人左右主动轮的旋转的角度和轮子半径来确定,该方法在小范围内可以对机器人进行较为准确的定位,但是由于累积误差的存在,在室外进行定位时会出现很大偏差。GPS 信息不会存在累计误差,但是其信息的精确度不够,因此文中采用里程计和 GPS 进行融合定位,通过 GPS 对里程计的定位信息进行修正。

首先采用里程计结合卡尔曼滤波对机器人进行定位,建立 x, y 坐标系,采样平台存在平动速度 v 和转动速度 ω ,并且平动速度 v 的方向与 x 轴所成夹角为 θ 。测量车的状态量为 $(x, y, s, \theta)^T$,观测量为 $(s, \theta)^T$ 。

则有采样平台的状态量为:

$$\dot{x} = f(x) = \begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

当采样频率较高时,两次采样之间采样平台位移变化很小且可以看作一常数 s ,则采样平台的运动也可简化成离散的。因此,假设 k 时刻,采样平台的状态为 $x(k), y(k), s(k), \theta$ 。根据运动学知识,易得在 $k+1$ 时刻的状态为:

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + s(k) \cos \theta \\ y(k+1) = y(k) + s(k) \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

将 GPS 数据作为观测对 $x(k)$ 和 $y(k)$ 进行更新,以获得移动平台的全局坐标。

1.2 采集信息的融合

环境信息采用安装在机器人前段的 SICK 激光,对前方 -90° 到 90° 的环境进行采集,每次采集 721 个点云数据,激光云台的俯仰空间是 -45° 到 -35° ,每度进行一次采样,激光的最大采样是 80 m,通过对云台的俯仰控制实现对机器人周围非结构化的三维环境进行采集,结合机器人的位姿,对采样的点云信息进行融合。云台的控制是在移动平台的定位和激光对环境扫描的基础上,结合扫描激光对环境的采集,并依据激光获取的深度信息结合扫描平台的位姿估计,对原始点云位置进行估计。每个初始传感量 r 表示在固定的地形图 ENU 坐标系。

$$r^{\text{ENU}} = \begin{pmatrix} E \\ N \\ U \\ 1 \end{pmatrix} = f(p, r) \quad (3)$$

其中, r 是初始传感量, p 是设置的参数,说明传感器对 ENU 地图框架的方向,而 $f()$ 是将初始量度转化成 ENU 结构的方程。

2 数据的预处理

基于激光传感器的移动机器人在采集周围未知的三维环境时,由于激光传感器自身因素和实验人员人为因素会存在各种误差,对实验结果有着重要的影响^[11-12]。

2.1 采样误差来源

安装移动机器人平台上的激光传感器采集数据误差的重要来源包括:混合像素、丢失数据、人为因素噪声。其中混合像素是指当激光束恰好击中物体的边界,使得部分激光束从物体边界反射回来,部分激光束从物体后面的背景反射回来,使得距离量测在物体距离和背景距离之间,当一束激光部分照射在物体上,部分照射在地面上。在混合像素的研究中,发现如果前

方物体的边界与背景的距离 ΔD 与激光脉冲长度 AL (SICK LRF 的 $\Delta L \approx 1 \text{ m}$) 接近时,则产生的混合点数非常大。

丢失数据是指当量测数据非法时产生的。如,由于入射角太大或反射物体的漫反射性太低,反射信号可能太弱。导致“SNR 太低”的错误。数据的丢失也可能因为激光束被阻挡而无法反射回 LRF。导致了 SICK LRF 的“操作溢错误”。阳光直射或相似光源可能导致耀眼,而导致在某个角度发生非法读数。

环境噪声是由于环境因素的干扰,比如太强烈的环境光以及运动中的震动,都可能导致产生噪声距离量测,从而在高度图上导致噪声。

2.2 数据滤波处理

对于安装在云台的 LMS 激光通过俯仰获取的周围的三维环境信息中因为混合像素干扰、人为因素等造成的采样误差导致的孤立点的处理,在一定程度上类似于一个灰度图像的处理,因此可以采用图像处理的滤波的方法进行处理,即可将安装在云台上的采样转化为距离图像。传统的图像滤波器包括:频率滤波器,如均值滤波器、高斯滤波器、维纳滤波器,中值滤波器及其改进形式,如加权中值滤波器、中心加权中值滤波器和自适应的中值滤波器等。其中,频率滤波器和维纳滤波器通常易于在抑制噪声的同时模糊图像的边界特征,且维纳滤波器需要预先知道噪声的功率谱且噪声与信号无关,但在距离图中这种要求无法满足。

中值滤波器因其能去除脉冲噪声并保留图像边界而著名,并且经实验证明能很好地去除激光距离图像中的混合像素。但在高度图中使用通常的中值滤波器可能会移走细小边界,且无法填补丢失数据。

文中采用一种针对高度图的新型中值滤波器,称为多模板中值滤波器。该滤波器根据高度图中不同噪声的不同特性而采用不同的中值滤波模板,从而在去除各种噪声的同时,很好地保持边界特征。对于具体的采样点云,构建 3×3 的窗口,定义针对某个测量 $\rho_{t,k}$ 的 3×3 观测扫描窗口,即

$$\begin{aligned} & \rho_{t-1,k-1}, \rho_{t-1,k}, \rho_{t-1,k+1} \\ & \rho_{t,k-1}, \rho_{t,k}, \rho_{t,k+1} \\ & \rho_{t+1,k-1}, \rho_{t+1,k}, \rho_{t+1,k+1} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, t 表示激光各次扫描的时间; k 表示单次测量对应扫描中的序号。

该滤波算法实验结果如下:图 1 为未滤波前点云图,图 2 为滤波后点云图,实验表明该算法既可有效滤除孤立点信息,同时对点云数据有很少丢失。

3 八叉树的数据存储

八叉树的数据结构表示方法由空间位置枚举法发



图 1 滤波前点云图



图 2 滤波后点云图

展而来,是一种层次数据结构。首先构建空间环境的最小包围正方体,将其视为八叉树数据结构模型的根节点,然后把该最小外接正方体依次分割为八个大小相同的小立方体,而小立方体则可以作为根节点的一个子节点,由此空间模型即可递归地细分为多个小立方体。文中采用的是如果一个激光点云数据被子立方体包含,即是激光点云恰好落在子立方体的体素里,则该子立方体记为 1;如果子立方体内不包含激光采样的点云数据点,则该子立方体记为 0。并依据点云的数据进一步对子立方体的子节点进行占据状态的更新,直到子节点的边达到最小精度为止。使用该方法可以实现每个节点的子节点的占据状态即可有一个 char 类型的数据进行表示,可以大大节省存储空间,由于室外环境很大,采集的点云数据量很大,在室外环境建模中八叉树的数据压缩和存储有着重要意义。

具体如图 3 所示,八叉树空间模型是将一个立方体空间分割成八个等大小的小立方体,并依次进行分割实现更为精细的空间描述,空间结构图中深色的体积分元表示被占有的体素,八叉树的数据结构可以方便对地图精度进行选择,以适应不同的平台需求。

设计实验 1 对校园内两棵树进行激光扫描,并构建点云图和八叉树图,其中图 4 表示采集激光数据的点云图;图 5 表示为采样数据的八叉树图的不同精度表示。实验表明该方法可以对真实的环境进行描述,

并有很好的表示效果。

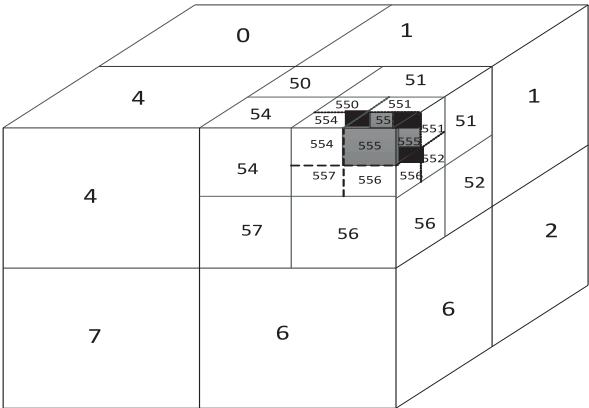


图 3 八叉树的空间表示



图 4 点云图表示



图 5 八叉树表示

设计实验 2 对校园内一广场进行扫描获取的激光扫描的环境数据,将数据构建出八叉树图分别如图 6 所示。



图 6 扫描环境的八叉树图

对两次实验中激光点云的存储占据的数据存储空间和八叉树存储占据的数据存储空间进行了对比,实验表明八叉树不仅可以准确地对地形进行表示,同时可以大大减少激光扫描数据存储所占的空间。

4 结束语

文中针对室外未知非结构化三维环境建模的问题,设计安装在室外移动机器人平台上的扫描激光对地形环境进行采集,并结合机器人定位信息将激光采集的数据转化为点云数据,采用八叉树进行存储,并对八叉树地形进行绘制,实验证明该方法可以对地形进行正确描述,同时可以大大节省数据存储占据的数据存储空间。

参考文献:

[1] Almazan C B, Youssef M, Aqrwala A K. Rover: An integration and fusion platform to enhance situational awareness [C]//Proc. of IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:582-587.

[2] 郑 玮,渠慎丰,邓鲁华. 基于 2D 激光扫描仪的环境探测与建模[J]. 电子测量与仪器学报,2006(增刊):1468-1472.

[3] 邹小兵,蔡自兴,于金霞,等. 基于激光测距的移动机器人 3-D 环境感知系统设计[J]. 高技术通讯,2005,15(9):38-43.

[4] Antonio J K. Optimal trajectory planning problem for spray coating[R]. Puehue: Puehue University, 1993.

[5] Cole D M, Newman P M. Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments [C]//Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:1556-1563.

[6] Nuchter A, Lingemann K, Hertzberg J, et al. 6D SLAM- 3D mapping outdoor environments[J]. Journal of Field Robotics, 2007,24(8/9):699-722.

[7] Pfaff P, Triebel R, Burgard W. An efficient extension to elevation maps for outdoor terrain mapping and loop closing[J]. International Journal of Robotics Research, 2007,26(2):217-230.

[8] Rivadeneyra C, Miller I, Schoenberg J R, et al. Probabilistic estimation of multi-level terrain maps [C]//Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:1643-1648.

[9] Orghidan R, Mouaddib E M, Salvi J, et al. Catadioptric single-shot rangefinder for textured map building in robot navigation [J]. IET Computer Vision, 2007,1(2):43-53.

[10] Moravec H P. Robot spatial perception by stereoscopic vision and 3D evidence grids[R]. USA: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1996.

[11] 庄 严. 移动机器人基于多传感器数据融合的定位及地图创建研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.

[12] 于金霞,蔡自兴,邹小兵,等. 基于动态自适应滤波的移动机器人障碍检测[J]. 自然科学进展,2006,16(5):618-624.

基于扫描激光的室外移动机器人三维环境建模

作者：[钱来](#)，[周波](#)，[戴先中](#)，[QIAN Lai](#)，[ZHOU Bo](#)，[DAI Xian-zhong](#)

作者单位：[东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室，江苏 南京 210096；东南大学 自动化学院，江苏 南京 210096](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2013(10)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjz201310002.aspx