

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: 31520091152847

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

融合图像与深度信息的移动机器人
室内三维地图构建

Indoor 3D Mapping for Mobile Robot Based on Integration
of Image and Depth Information

王 丽 萍

指导教师姓名: 潘 伟 教授

专业名称: 计算机应用技术

论文提交日期: 2012 年 5 月

论文答辩时间: 2012 年 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: PS. (国) 长

评 阅 人: _____

2012 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 五丽萍

2012年 6月 6日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）： 王丽萍

2012年6月6日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

移动机器人三维环境建模有着重要的研究价值和广阔的应用前景。在军事上,三维地形可视化能力可以为作战提供重要情报信息。在对未知或危险环境进行探索时,如进行太空、海底、矿井环境探索时,三维环境地图构建可以帮助人们了解未知环境信息,进而指导移动机器人完成特定任务。而在日常生活中,在大型环境如机场、商场、仓库等环境中,良好的可视化功能及人机交互界面三维模型可以提供更多的信息,从而可以更加有效地完成监控和导航任务。

本文以 Pioneer3-AT 移动机器人为实验平台,在实际室内环境中,随着机器人的移动,运用 Kinect 摄像头采集环境的彩色图像及深度信息,并由这些信息来实现环境的三维建模。在室内三维环境建模实现框架中,文中先采用 SURF 算法对彩色图像进行特征提取;随后结合深度信息,运用随机采样一致性方法估计参考图像与待匹配图像对应点之间的转换关系,并基于此转换关系将两幅图像进行初始配准;接着,我们用广义的最近点迭代算法来计算图像之间更加精确的转换关系,并将图像进行进一步配准,同时,运用该转换关系还可以估计出机器人的运动轨迹;然后,将配准好的图像运用通用图优化算法进行优化,得到环境的三维点云图;最后,我们采用基于八叉树的栅格占据模型将三维点云图立体栅格化,得到室内环境的三维立体栅格地图。

相比其他的三维环境建模方法,本文中运用广义的最近点迭代算法进行图像间的配准,由于引入了概率模型,而且将传统点与点之间的匹配扩展到面与面之间的匹配,大大提高了匹配的精度;同时,由于运用了八叉树栅格占据模型来绘制三维地图,不仅满足了地图的多精度显示、易更新、易扩展等需求,而且该方法空间效率很高,在很大程度上节省了地图的存储空间。

本文中所提的室内三维环境建模方法在实际室内环境中进行测试时,取得了令人满意的三维建模效果,而且能准确估计机器人的运动轨迹。

关键词: 移动机器人, 三维地图, 广义最近点迭代, 八叉树立体栅格图

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

3D environment modeling for mobile robot poses important value on research and application. In military affairs, 3D terrain visualization ability could offer valuable intelligence information. In exploration of unknown or dangerous environment, for example, in the outer space, seabed or the mines, 3D map could help people recognize unknown environment information and guide the mobile robot to accomplish the tasks. And in our daily life, in the large environment like the airport, super market and the storage, the good visualization function and man-machine interaction interface could give more information. With these information, the mobile robot could implement monitoring and navigation tasks effectively.

We use Pioneer3-AT mobile robot as our experiment platform in the paper. In the indoor environment, with the moving of the robot, we use the Kinect camera to capture the color and depth images of the current environment and achieve 3D modeling with these images. Our approach consists of 5 steps. First, we extract SURF features from the incoming color images. Then we estimate the relative transformation between the frames using RANSAC. The third step is to improve this initial estimate using a variant of the ICP algorithm. As the pair-wise pose estimates between frames are not necessarily globally consistent, we optimize the resulting pose graph in the fourth step using the G2O solver. Finally, we use the Octomap library to generate a volumetric representation of the environment.

By contrast to other approaches, in this paper we combine the ICP and 'point-to-plane ICP' algorithms into a single probabilistic framework. We then use this framework to model locally planar surface structures from both scans. While maintaining the speed and simplicity of ICP, the GICP method is more robust. In the meanwhile, we use OctoMap to represent the 3D map. This technique is able to represent full 3D models including free and unknown areas and keep the memory requirement at a minimum.

The 3D modeling approach presented in this paper realizes the satisfying 3D modeling performance in indoor environment, and we could estimate the trajectory of the mobile robot by using our method.

Key Words: mobile robot; 3D map; GICP; OctoMap

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | III |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 三维环境建模在移动机器人研究领域的应用与发展 | 2 |
| 1.3 三维室内环境建模方法 | 3 |
| 1.3.1 基于激光扫描的三维几何建模..... | 3 |
| 1.3.2 基于图像立体匹配的三维建模..... | 5 |
| 1.3.3 基于环境几何与颜色信息相结合的三维建模..... | 7 |
| 1.4 三维环境地图介绍及比较 | 8 |
| 1.5 本文主要工作及创新点 | 11 |
| 1.6 论文内容及结构 | 12 |
| 第二章 移动机器人室内三维地图构建 | 14 |
| 2.1 SURF 图像特征提取 | 14 |
| 2.1.1 尺度空间极值检测..... | 15 |
| 2.1.2 特征点定位..... | 15 |
| 2.1.3 方向赋值..... | 16 |
| 2.1.4 特征描述符计算..... | 16 |
| 2.2 图像配准方法 | 17 |
| 2.2.1 RANSAC | 17 |
| 2.2.1.1 RANSAC 提出的背景 | 17 |
| 2.2.1.2 RANSAC 方法的思想及形式化描述 | 18 |
| 2.2.1.3 RANSAC 方法的参数估计 | 19 |
| 2.2.2 广义 ICP 算法 | 21 |
| 2.2.2.1 标准 ICP 算法 | 22 |
| 2.2.2.2 点到面 ICP 算法 | 23 |
| 2.2.2.3 广义 ICP 算法 | 24 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 2.3 通用图优化算法 | 26 |
| 2.4 三维立体栅格地图构建 | 28 |
| 2.4.1 OctoMap 方法所构建的地图特点 | 29 |
| 2.4.2 OctoMap 绘图方法框架 | 30 |
| 2.5 本章小结 | 33 |
| 第三章 实验设计及分析 | 34 |
| 3.1 实验平台介绍 | 34 |
| 3.1.1 Pioneer3-AT 移动机器人平台 | 35 |
| 3.1.2 kinect 工作原理及功能介绍 | 35 |
| 3.1.2.1 Kinect 简介 | 35 |
| 3.1.2.2 Kinect 工作原理 | 36 |
| 3.1.3 OpenNI | 36 |
| 3.1.4 PCL | 37 |
| 3.2 实验所采用算法框架 | 38 |
| 3.3 实验结果及分析 | 39 |
| 3.3.1 用 Kinect 采集图像数据 | 39 |
| 3.3.2 局部图像配准 | 41 |
| 3.3.3 移动机器人运动轨迹 | 43 |
| 3.4 本章小结 | 44 |
| 第四章 工作总结及展望 | 45 |
| 参 考 文 献 | 47 |
| 附录 攻读硕士期间发表的论文 | 52 |
| 致谢 | 54 |

Table of Contents

| | |
|---|------------|
| Abstract in Chinese | I |
| Abstract in English | III |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Background | 1 |
| 1.2 The application and development of 3D environment modeling for mobile robot | 2 |
| 1.3 The methods of 3D indoor environment modeling | 3 |
| 1.3.1 3D geometric modeling using laser scanner | 3 |
| 1.3.2 3D modeling based on stereo image matching | 5 |
| 1.3.3 3D modeling with the combining of environment geometric and color information..... | 7 |
| 1.4 Introduction and comparison of 3D environment maps | 8 |
| 1.5 The main work and innovation in this paper | 11 |
| 1.6 The structure of this paper | 12 |
| Chapter 2 Indoor 3D mapping for mobile robot | 14 |
| 2.1 Speeded-Up Robust Features Extraction | 14 |
| 2.1.1 Extrema detection in scale space | 15 |
| 2.1.2 Interest point localization..... | 15 |
| 2.1.3 Orientation assignment | 15 |
| 2.1.4 Interest point descriptor computing | 15 |
| 2.2 Image matching methods | 15 |
| 2.2.1 RANSAC | 17 |
| 2.2.1.1 Backgrounds of RANSAC..... | 17 |
| 2.2.1.2 The theory and the formal specification of RANSAC..... | 17 |
| 2.2.1.3 Parameters estimation of RANSAC..... | 17 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.2 Generalized ICP | 21 |
| 2.2.2.1 Standard ICP | 22 |
| 2.2.2.2 Point-to-plane ICP | 23 |
| 2.2.2.3 Generalized ICP | 24 |
| 2.3 General graph optimization method | 26 |
| 2.4 3D volumetric grid map construction | 28 |
| 2.4.1 The features of OctoMap | 29 |
| 2.4.2 The framework of OctoMap | 30 |
| 2.5 Summary of this chapter | 33 |
| Chapter 3 The experiment Design and Analysis | 34 |
| 3.1 Introduction of the experiment platform | 35 |
| 3.1.1 Introduction of Pioneer3-AT | 35 |
| 3.1.2 Introduction of working principles and functions for Kinect | 35 |
| 3.1.2.1 Introduction of Kinect | 35 |
| 3.1.2.2 Working principles of Kinect | 36 |
| 3.1.3 Open Natural Iteration | 36 |
| 3.1.4 Introduction of Point Cloud Library | 37 |
| 3.2 The framework of algorithms in the experiment | 38 |
| 3.3 Experiment result and analysis | 39 |
| 3.3.1 Images captured using Kinect | 39 |
| 3.3.2 Registration between images | 41 |
| 3.3.3 The trajectory of the mobile robot | 43 |
| 3.4 Summary of this chapter | 44 |
| Chapter 4 Conclusion and future work | 45 |
| References | 47 |
| Appendix: my published papers | 52 |
| Acknowledgements | 54 |

第一章 绪论

1.1 引言

近年来,随着人工智能技术的飞速发展,智能移动机器人的研究取得了世界范围内的关注。智能机器人的三大关键技术为:定位、地图构建以及路径规划。这就要求机器人在自身所载的传感器如激光雷达、摄像机、里程计、陀螺仪、红外传感器等自动获取周围环境信息,对自身所处位置进行准确定位,建立空间环境模型,并进行有效的路径规划,以到达特定的目标及完成指定的任务。智能移动机器人在军事、民用以及科学研究中,都具有重要的研究与应用价值。鉴于此,美国、德国、日本等发达国家早在 20 多年前就开始投入大量的人力、物力和财力,开展智能移动机器人方向的研究,并且取得了重大进展。研究成果广泛应用于工农业、交通运输、军事和医疗卫生等行业。在我国,移动机器人发展相对较为缓慢,但也具有巨大的科研潜力和应用需求,如太空和海底探索、矿井环境探测、深海光缆修复、化工等高危车间自动搬运以及服务型机器人等。

然而,在一些大规模的未知环境中,机器人的应用通常受到很大限制。主要原因在于:在如矿井探测、危险环境救援等特殊环境及工作任务下,人类无法进入现场亲自指导机器人运动,机器人必须依赖自身实时对环境进行自主探测和构建,并以此为基础实现机器人的智能导航、路径规划等其他智能任务。由于机器人与人类在对环境感知上的差异,机器人无法理解传统的人工地图,必须为机器人建立它能理解的环境地图,并能与人类进行交流。为实现机器人在大型未知环境中的穷尽快速遍历,指定有效的自动探索方案是非常重要的。然而这些难题至今仍未得出理想的解决方案。

因此,为实现移动机器人在大型未知环境中的自主探索能力,地图创建是急需解决的关键问题。地图构建,即在机器人运动过程中,运用不确定的传感器测量数据来建立最优的环境表示。

从目前这一领域研究水平来看,我国与世界发达国家研究水平的差距是非常明显的,还处于刚起步阶段,是一个充满挑战和希望的科研方向。因此需要加快移动机器人地图方面的研究,以提高我国在智能移动机器人领域的技术水平。

本论文主要研究在室内环境下,在机器人移动过程中,由视觉传感器获取机

机器人周围环境的图像及深度信息，并运用这些信息来构建三维环境地图。本章主要介绍三维环境建模在移动机器人研究领域的应用与发展及三维室内环境建模方法，并对多种三维环境地图进行介绍及比较，最后简要介绍本文工作与文章组织结构。

1.2 三维环境建模在移动机器人研究领域的应用与发展

随着移动机器人研究的不断深入及计算机视觉技术的快速发展，移动机器人三维环境建模成为该领域新的研究方向。它是与移动机器人控制、多传感器数据融合、计算机图形学及机器人视觉等多学科紧密相关的综合技术，对推进移动机器人发展有着重要意义。国外在移动机器人三维地图构建方面的发展比较快，不仅在实验室有了应用，而且研究成果也已逐步应用到实际环境中。

国外比较知名的研究机构，如美国斯坦福人工智能研究中心实现了基于立体视觉移动机器人的三维环境重建；乔治亚大学实现了基于激光雷达扫描数据的三维环境建模；卡内基梅隆大学机器人研究所实现了基于立体视觉与三维占据栅格的机器人空间感知以及基于激光数据和图像的三维室内环境建模；Aachen 科技大学计算机实验室在移动机器人三维动态室内环境的研究中取得了很大进展；瑞典 Örebro 实现了基于激光扫描与全景视觉的移动机器人室内三维环境建模^[1]。

相较而言，国内的相关研究进展较为缓慢。主要的研究机构有上海交通大学的机器人研究所、北京大学的视听觉国家重点实验室及中国科学院自动化所模式识别实验室等^[2,4]。其中，中国科学院自动化所已经实现了三维场景的真实感漫游以及三维模型重建等，但还没有应用到机器人上。

移动机器人的三维环境重建是指，在室内或室外环境中，随着机器人的运动，根据装载在机器人上的传感器（如激光雷达、红外传感器、视觉传感器等）获取三维环境的场景数据，在车载计算机或通过网络传输到远程控制计算机上对传感器数据进行处理，来对环境进行三维重建的技术。如何利用有效的传感器尽可能多地获得环境信息，实时完成环境建模，从而为机器人导航提供可靠的环境信息是研究的主要目的所在。

移动机器人三维环境建模有着重要的研究意义和广阔的应用前景。尤其在军事应用上，美国在 2004 年的军事报告中指出，要在美国的陆军作战系统中，发

展数字地形支援系统。为战区的指挥官提供相关的地形和作战空间环境信息，从而实时了解战场情报、支持作战行动，为指挥和控制系统以及武器平台提供地形可视化能力。而在日常社会生活中，在大型环境如机场、商场、仓库等环境中，良好的可视化功能及人机交互界面三维模型相比传统的二维地图，可以提供更多的信息，从而可以更加有效地完成监控任务。举个简单的例子，在三维模型下可以对室内环境中的门或窗户进行建模，而运用二维地图只可以表示其大概位置。而在三维模型的可视化研究领域，主要研究如何简化模型的组织与存储以及地图的表面绘制技术等。

1.3 三维室内环境建模方法

在智能移动机器人研究中，要实现移动机器人的真正智能，首先必须具备对环境正确感知能力，也就是说要求机器人能够通过传感器识别和测量周围环境，具备自学习和自适应能力。这样，它才能够进行精确的定位与导航，完成特定的任务。

1.3.1 基于激光扫描的三维几何建模

在众多的传感器中，激光扫描仪因其测距速度快、精度高、获取信息直观等诸多优点在军事、民用和航空等领域受到广泛关注^[4]。在智能移动机器人研究中，激光扫描仪、CCD 摄像头、声纳等，都成为机器人必不可少的外部传感器。

激光扫描仪是一种主动感知系统。它的工作原理是：以一定的规律向环境中的目标发出受控制的激光，然后再通过接收由目标反射回的激光获得物体的深度信息。目前，激光扫描仪主要有二维和三维两种。二维激光扫描仪只在一个固定的扫描平台上获取距离信息，即只能进行单线扫描。对于移动机器人平台来说，大多采用 SICK 公司的 LMS 系列激光扫描仪，如图 1.1 所示。三维激光扫描仪在二维扫描的同时，还可以转动扫描平面，进行多线扫描^[5]。专用的三维激光扫描仪装置复杂度高，价格也很昂贵。为了满足科研和实验的需求，通常采取改装或组合二维激光扫描仪的方法来达到三维扫描的效果。如，在二维激光扫描仪的基础上再附加一个伺服系统（云台），来实现第三个空间方向上的扫描，由此完成对环境的三维扫描；或者还可以将两个二维激光扫描仪正交放置（即其中一个水

平放置, 另一个垂直放置), 这样也可以达到部分三维扫描的效果^[2]。

德国自主智能系统研究所的 Hartmut Surmann 等人用三维激光扫描仪来进行室内环境三维建模。他们所用的三维激光扫描仪就是在二维激光扫描仪的基础上, 增加了一个水平方向的伺服系统。而 Thrun 等人、Frush、和 Zakhor、Zhao 和 Shibasaki 等将两个二维激光扫描仪进行组合来获取三维空间数据。其中, 水平放置的激光扫描仪用来定位与二维地图构建, 而将垂直方向的激光扫描仪扫描到的距离值换算为同一坐标系下的三维坐标点。但该方法存在一个缺点, 就是在移动机器人的运动过程中, 无法对物体的侧面进行扫描。另外, 为了减少扫描遮挡, 可再在机器人平台上斜向 45° 方向放置两个激光扫描仪。但这些方法都只适用于平坦的结构化环境中。除此之外, 也可以直接采用三维激光扫描仪来对环境进行扫描。如在 RESOLV 工程中, 为了实现虚拟场景和远程再现, 在对室内环境进行三维建模时, 就是在两个机器人上分别各用一个 RIEGL 三维激光扫描仪, 并对扫描到的图像采用最近点迭代 (Iterative Closest Point) 方法进行扫描匹配和减少遮挡; 而在 AVENUE 计划中, 为了实现城市环境的三维重建, 在机器人平台上利用 CYRAX 三维激光扫描仪来对环境进行扫描。

但上述所有的方法中都存在一个问题, 就是在基于激光扫描的三维环境重建中, 无法获得环境的纹理信息, 因此只能以点云图的形式对环境进行几何表示。



图 1.1 二维激光扫描仪 SICK LMS100
Fig.1.1 2D Laser scanner SICK LMS100

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库