

文章编号: 1001-0920(2005)07-0815-04

移动机器人几何-拓扑混合地图的构建及自定位研究

庄 严^{1,2}, 徐晓东^{1,2}, 王 伟¹

(1 大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024;

2 中国科学院 沈阳自动化研究所 机器人学重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 基于墙角、房门和通路等高级环境特征的辨识与提取, 依据几何和拓扑环境模型完成混合地图的构建, 并根据混合地图的特点, 提出在局部几何环境采用扩展卡尔曼滤波算法实现移动机器人的位姿跟踪, 而在拓扑地图的节点位置则根据绑定的高级环境特征进行位姿再校正的混合定位方法. 将该方法应用于实际移动机器人平台, 所得结果证明了方法的有效性和实用性.

关键词: 几何-拓扑混合地图构建; 自主移动机器人; 扩展卡尔曼滤波; 自定位

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Mobile Robot Geometric-topological Map Building and Self-localization

ZHUANG Yan^{1,2}, XU Xiaodong^{1,2}, WANG Wei¹

(1. Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2 Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Correspondent: WANG Wei, E-mail: wangwei@dlut.edu.cn)

Abstract: According to the practical result of geometric-topological map building, a hybrid localization approach is presented to complete both extended Kalman filter-based pose tracking in local geometric map and re-localization in topological node using the binding high-level features. The method is effective to avoid localization failure in the cause of unexpected collisions or unstructured dynamic environment. Experiment results implemented in the real mobile robot show the validity and practicability of the method.

Key words: Geometric-topological map building; Autonomous mobile robots; Extended Kalman filter; Self-localization

1 引 言

地图构建和自主定位是移动机器人研究中的重点问题,也是完成室内环境机器人导航和路径探索等任务的基础.移动机器人基于几何地图进行自主定位的研究已有很多成功的应用实例^[1,2].单纯的几何表述法虽然对环境的描述直接准确,但由于里程计的误差漂移很难维持全局环境的一致性,而且对动态环境干扰的适应能力较差.相对而言,拓扑表述具有全局连贯性好、鲁棒性强的特点,适合对可提取

大量高级特征的室内结构化环境进行描述.但拓扑节点在空间上的离散使得机器人无法在非拓扑节点位置进行定位.根据几何和拓扑两种表述方法的优缺点,创建几何-拓扑混合环境地图的研究正逐渐受到重视^[2,3].这种混合方法在全局空间采取拓扑描述以保证全局连续性,而具体局部环境中采用几何表述则有利于移动机器人精确定位的优势得以发挥.

位姿跟踪是目前研究较多的一种移动机器人定位问题^[2].位姿跟踪要求机器人的初始位姿事先给

收稿日期: 2004-08-17; 修回日期: 2004-10-19

基金项目: 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室基金项目(RL 200204); 辽宁省高等学校学科拔尖人才资金项目(2003-54).

作者简介: 庄严(1975—),男,沈阳人,博士,从事机器人地图创建、移动机器人定位与导航研究;王伟(1955—),男,辽宁鞍山人,教授,博士生导师,从事预测控制、智能控制等研究.

定,其定位过程是通过从观测所获取的“新息”来校正依据里程计模型所预估的机器人位姿。扩展卡尔曼滤波(EKF)是一种用于机器人位姿跟踪的常用定位方法,其效果主要取决于由里程计误差造成的机器人位姿误差分布与理想高斯分布之间的偏差程度。由于只采用高斯分布一种误差模型,当有碰撞等意外情况发生时会造成局部地图和全局地图之间无法正确匹配,同时机器人位姿的突变也会造成不可恢复的定位失败。

为提高机器人自定位的实用性和鲁棒性,本文采用移动机器人基于几何-拓扑混合地图进行自主定位的方法。该混合定位方法既可基于几何地图通过EKF算法实现机器人位姿的局部精确估计,又可利用拓扑地图的环境表述受里程计累计误差影响小的优点来保证定位的全局一致性。同时对于由外部动态干扰而造成的EKF定位失败情况,机器人可利用拓扑节点附近的高级环境特征来重新设定自身位姿,从而提高移动机器人自定位的鲁棒性和连续性。

2 几何-拓扑混合地图的构建

2.1 几何-拓扑混合环境模型的建立

自主移动机器人通过传感器实现对外部环境的感知,传感器数据经处理后以某种抽象的形式对环境空间进行表述,并作为地图信息存储在机器人中。机器人空间环境的表述与其环境模型的建立密切相关。本文针对室内环境所建立的模型分为全局拓扑表述和局部几何表述两部分:整体环境通过拓扑节点串连起来,维护了整体环境表述的全局一致性;而以每个拓扑节点为核心所采用的几何表述则可确保局部精确定位的实现。这样所建立的几何-拓扑混合环境模型可将几何和拓扑两种环境表述的优势都有效地发挥出来,使得移动机器人定位和地图构建都易于实现。

几何-拓扑混合环境模型是使用几何和拓扑两种描述方式对移动机器人工作环境所进行的抽象表述。图1为由高级环境特征所构成的走廊几何-拓扑环境模型示意图。图中墙壁、拐角、房门、通路等静

态物体和环境特征采用线段、线段的组合以及多边形等几何元素来表示。拓扑是从严格定量测量中抽象出来的各种对象之间的关系,所以拓扑节点应依据环境中高级特征的分布来选取。以图1所示模型为例,拓扑节点的选取主要依据走廊环境中的房门和通路这两种高级特征,每个拓扑节点都与一个或多个高级特征进行绑定。而拓扑边则给出了相邻拓扑节点间的可行路径,同时也指明了机器人从走廊向办公室等局部环境进行切换的可行通路。

2.2 混合地图的具体构建方法

为确保按照几何-拓扑环境模型进行混合地图构建的可操作性,首先要完成拐角、房门和通路等高级环境特征的辨识和提取。拐角是移动机器人室内工作空间中最常见的环境特征,由两条相互垂直相交的线段特征构成,所以拐角特征的提取最简单且鲁棒性好。实际应用中由于测量噪声干扰及机器人所处位置角度的限制,从激光测距原始数据中提取的构成拐角的两条线段未必有共同的角顶点,而且两条直线也无法保证完全垂直。假设 $(x_1, y_1, x_{c1}, y_{c1})$ 和 $(x_2, y_2, x_{c2}, y_{c2})$ 是形成拐角的两条近似垂直线段, (x_{c1}, y_{c1}) 和 (x_{c2}, y_{c2}) 是处于拐角区域的线段端点坐标,实际应用中拐角的判断准则如下:

$$\left| \left| \arctan \left(\frac{y_1 - y_{c1}}{x_1 - x_{c1}} \right) - \arctan \left(\frac{y_2 - y_{c2}}{x_2 - x_{c2}} \right) - 90 \right| < e_s, \quad (1)$$

$$\sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2} < e_d, \quad (2)$$

其中阈值 e_s 和 e_d 是通过实验获取的经验值。因 e_d 的取值较小,故实际拐角的端点 (x_c, y_c) 坐标可按下式近似计算:

$$x_c = \frac{x_{c1} + x_{c2}}{2}, y_c = \frac{y_{c1} + y_{c2}}{2}. \quad (3)$$

房门和通路也是室内环境中理想的自然陆标,该特征的成功提取将使拓扑环境节点的选取变得简单直接。本文采取激光和视觉传感器相互协作,即房门的二维水平线段和门框的垂直边缘在特征层次进

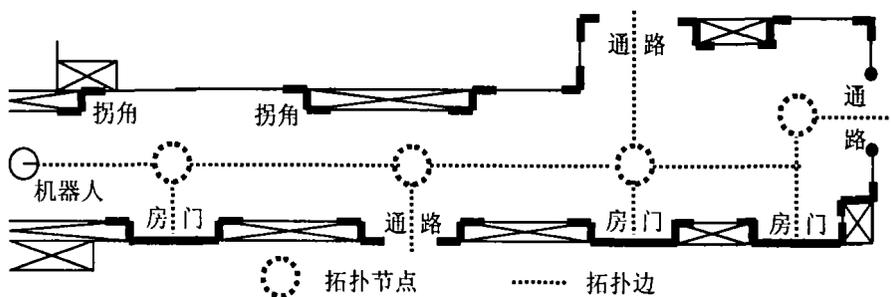


图1 由高级环境特征构成的走廊几何-拓扑环境模型

行融合的方法来实现房门的有效识别 室内环境中房门的具体判断主要依据门框两侧垂直线段的位置参数及其相互之间几何关系来完成 通过 CCD 提取的门框两侧垂直线段特征和激光测距仪在特定高度提取的水平线段特征的匹配可确定房门宽度 与拐角和房门等特征不同, 通路特征无法用具体的几何特征来表示, 而是对室内环境中开放区域的一种抽象描述 室内环境中相对封闭的邻近局部空间之间必有可通过的路径将其相互连接, 这就是通路的特征 室内走廊环境中打开的房门是一种最常见的通路特征, 这也是机器人在走廊和办公室环境之间转换的主要标志

机器人基于先验的室内环境信息, 利用前面介绍的拐角、房门和通路等特征的提取算法, 自主完成几何-拓扑混合地图的构建 混合地图生成的关键是如何合理地完成拓扑节点的选择, 具体可分为等间距法和变间距法两种规划方式 等间距法是按照统一的间距来安排所有拓扑节点的分布 这种方法易于实现, 而且拓扑边的进一步规划也非常简单, 但会造成部分拓扑节点没有足够的环境特征与其对应, 从而增加该节点处定位的难度 而变间距法对拓扑节点的选取则根据是否有足够的环境特征与之绑定这一前提条件, 虽然判断过程相对复杂, 但其具有更强的灵活性, 易于工作在实际环境的移动机器人的定位与导航中实现

3 基于几何-拓扑混合地图的自主定位

3.1 基于几何地图位姿跟踪的实现

本文的移动机器人自主定位采取全局依据拓扑地图进行定位, 而在拓扑节点间依据局部几何地图进行位姿跟踪的混合定位方法 机器人基于几何地图的位姿跟踪采用 EKF 迭代算法, 只有“新息”才能被当前的计算所使用, 因而不需要大量的数据存储且易于实现 EKF 具体分为状态预测、实际观测、测量预估、匹配以及状态更新等步骤, 其中状态预测是移动机器人基于里程计模型实现系统状态的一步预估, 而实际观测则是移动机器人通过外部传感器来获取可用于进行定位的各种环境特征 测量预估是全局地图中的环境特征转换到机器人自身坐标系下, 确保其与机器人当前的实际观测能构成一系列的“特征对”, 并通过 Mahalanobis 准则进行匹配 从匹配的“特征对”可得到测量预估与观测间的新息协方差矩阵, 具体包括机器人位姿预测的协方差、全局线段特征协方差和机器人观测噪声 3 部分 最后利用迭代位姿更新公式和位姿协方差更新公式可完成机器人位姿状态的更新 通过 EKF 算法实现位姿跟踪的具体理论推导和结果在前期工作^[4]中已具体给

出

3.2 几何-拓扑混合定位对定位失败问题的解决

因基于 EKF 算法的移动机器人位姿跟踪必须满足误差为高斯分布且误差传播为线性这一前提假设, 而实际应用中该假设在传感器的观测中可以接受, 但对里程计模型的误差增长则较难满足, 这也是该假设对卡尔曼滤波应用的主要局限 上述假设条件未被满足会导致 EKF 定位的失败, 进而无法保证机器人实际工作的连续性 由于在全局拓扑地图构建中每个拓扑节点都与高级环境特征进行了绑定, 这样即便因为碰撞等意外情况造成机器人位姿跟踪的失败, 其仍然可在拓扑节点处基于绑定的高级特征完成 EKF 算法的重新初始化, 从而确保整个定位过程的连续性和鲁棒性

拓扑地图给出的是一种经过抽象的全局环境关系, 基于拓扑环境的全局定位要求机器人工作环境中可提取的拓扑节点数目不能太少且工作环境应有多样性, 即不同节点所绑定的环境特征要有所变化 以图 2 为例, 机器人从位置 1 处运行, 如果起始位姿已知, 则可直接搜索最近的拓扑节点并运行到该节点 到达后机器人提取该节点附近的环境特征, 并与该节点绑定的先验特征进行匹配, 用获取的“新息”对机器人位姿进行校正, 然后自主向下一节点运动

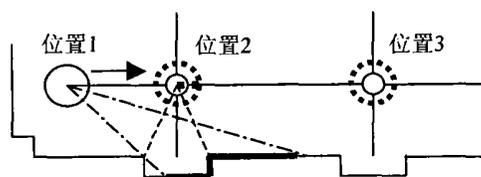


图 2 机器人在走廊环境进行拓扑定位示意

对于机器人起始位姿不确定的情况, 本文采用一种基于拓扑节点链表匹配搜索的定位方法 该方法思想是机器人在无法确定自身位姿的环境中不断提取环境中的高级特征, 自行构建出有限个节点并生成拓扑节点链表, 再通过与先验拓扑节点链表进行比较来确定自身位置 经过匹配搜索后如果候选拓扑节点仍不唯一, 则需要机器人继续运动再对剩余候选节点进行区分

4 实验结果

实验中使用的 SmartROB-2 移动机器人平台配备有激光测距仪和 CCD 摄像机两种外部传感器, 能采集丰富的室内环境信息, 机器人工作环境为走廊和门厅等准结构化的室内环境 移动机器人基于室内环境先验信息所完成的走廊和门厅部分几何-拓扑混合地图构建结果如图 3 所示 图中节点的选取是根据高级特征房门的分布实现的 根据走廊环境

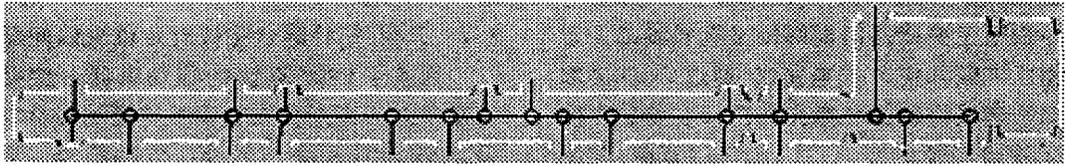
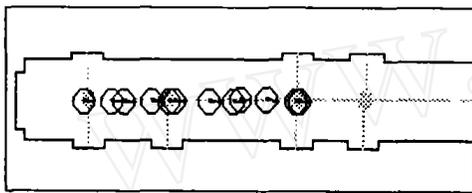


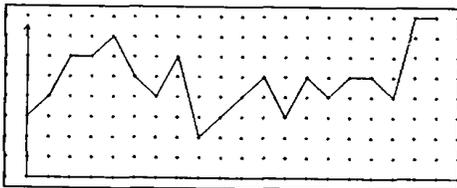
图3 几何-拓扑混合地图生成结果

特点,所有拓扑节点纵向均处于走廊中线,而拓扑边的规划是将走廊中线上相邻节点直接连接起来

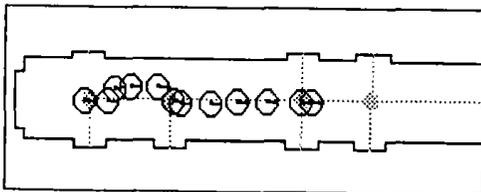
实验中开发了基于网络的控制软件来实现对移动机器人混合地图的构建以及几何-拓扑混合定位结果的实时监控。在机器人运动过程中,全局地图的拓扑节点和高级环境特征实时地转换到机器人坐标系下,当监控软件的实时显示网页按预先设定的频率进行动态刷新时,机器人在地图中所处位置以及环境特征匹配的结果也相应动态地进行显示。这样研究者便可实时获得与拓扑节点绑定的房门特征和机器人具体观测的环境特征的实际匹配结果



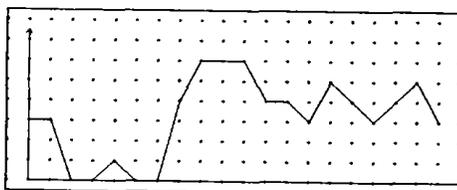
(a) 静态环境自定位结果



(b) “特征对”成功匹配数目曲线



(c) 动态环境自定位结果



(d) “特征对”成功匹配数目曲线

图4 机器人几何-拓扑混合定位实验结果

下面通过实验验证几何-拓扑混合定位方法对定位失败问题解决的有效性。按照混合定位方法,机器人在走廊环境中沿拓扑边依次向前运动,并采用EKF定位实现位姿跟踪。当其运行到拓扑节点处,机器人要根据拓扑节点绑定的高级环境特征进行位姿再校正。图4给出了混合定位的实验结果,其中机器人位姿用圆圈和圈中短线表示。为直观反映EKF定位效果,定位周期中“特征对”成功匹配的数目用曲线画出。在静态走廊环境中,机器人经过拓扑节点按照拓扑边进行运行的定位结果如图4(a)所示。图4(b)给出了连续20次定位中成功匹配的“特征对”数目曲线,平均值为4.85个。在有大量动态干扰(如随机走动的人)的同一环境的定位实验中,机器人在向第2个拓扑节点运动过程中受人为制造的碰撞而导致位姿的突变。定位结果图4(c)给出的机器人系列位姿表明,几何-拓扑混合定位方法在局部定位失败后,可利用拓扑节点处位姿再校正完成EKF算法的重新初始化来保证后续定位的连续性。图4(d)同样给出了连续20次定位中成功匹配的“特征对”数目曲线,由于走廊环境中动态因素的干扰,其平均值显著下降到3.2个。特别是发生碰撞后由于位姿误差已不满足高斯分布,成功匹配的“特征对”数目也趋近于零。但经过下一节点进行位姿校正后,成功匹配的“特征对”数目又恢复了正常。

5 结 语

本文的研究重点在于如何基于先验室内环境信息来构建几何-拓扑混合环境地图,并基于所构建的地图进行移动机器人的自主定位。所提出的移动机器人混合定位方法不但可满足移动位姿跟踪的实时要求,而且在定位过程中出现碰撞等意外事件时仍能保证自主定位的连续性和可靠性,这是因为机器人位姿误差通过拓扑节点处的校正能够保证在事先假设的高斯分布范围之内。与基于概率模型的全局定位算法(如Markov定位)相比较,本文所提定位方法计算负担小,能保证嵌入式移动机器人系统的实时性,且不涉及复杂的运动模型和传感器观测率模型的构建问题,具有一定的实用价值。

(下转第822页)

实验中,在 $t = 250$ s 时,压力容器压力设定值从 176.9 kPa 阶跃至 201.4 kPa,然后在 $t = 800$ s 时变回原值。同时,空气出口流量设定值在 $t = 250$ s 时从 $0.85 \text{ m}^3/\text{hr}$ 阶跃至 $1.42 \text{ m}^3/\text{hr}$,在 $t = 800$ s 时变回原值,以测试系统性能。图 2 为压力槽的控制结果,图 3 为进出口阀流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 的估计。非线性观测器能够很好地估计进出口阀流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} ,控制结果表明,所设计的自适应控制器/观测器对非线性的、耦合的、时变的多变量对象具有较好的控制性能。

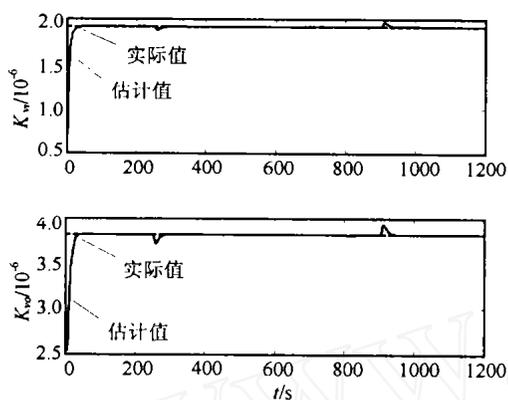


图3 进出口阀流量系数 K_{vi} 和 K_{vo} 的估计

4 结 语

本文提出的非线性自适应控制方法是将非线性多变量模型直接嵌入到控制器中,该控制器的参考轨迹是一条标准的二阶曲线,并将CMC算法与非线性观测器结合,构成自适应控制系统。在没有控制约束以及模型精确的情况下,可以使得闭环系统是一个标准的二阶系统,控制器参数具有明显的物理意义,且参数整定方便,是一种有效的非线性控制策略。

参考文献(References)

- [1] Lee P L, Sullivan G R. Generic Model Control[J]. *Computers Chemical Engineering*, 1988, 12: 573-584
- [2] Yamuna K, Gangiah K. Adaptive Generic Model Control: Dual Composition Control of Distillation[J]. *AIChE J*, 1991, 37(11): 1634-1642
- [3] Delisa M P, Chae H J, Weigand W A, et al. Generic Model Control of Induced Protein Expression in High Cell Density Cultivation of Escherichia Coli Using Online GFP-fusion Monitoring [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2001, 24: 83-91.
- [4] Guo B J, Hua X M, Arthur Jutan. Generic Model Controller Tuning for Chemical Processes with Input Saturation[J]. *Canadian J of Chemical Engineering*, 2002, 80(2): 275-280
- [5] Guo B J, Yu J S. A Common Model Controller [A]. *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hangzhou, 2004, 1: 805-808
- [6] Henson M A, Seborg D E. Adaptive Nonlinear Control of a pH Neutralization Process [J]. *IEEE Trans on Control Systems Tech*, 1994, 2(3): 169-175.
- [7] Clarke-Pringle T, MacGregor J F. Nonlinear Adaptive Temperature Control of Multiproduct, Semi-batch Polymerization Reactors [J]. *Computers Chemical Engineering*, 1997, 21(12): 1395-1404
- [8] Farza M, Hammour H, Jallut C, et al. State Observation of a Nonlinear System: Application to (bio) Chemical Processes[J]. *AIChE J*, 1999, 45(1): 93-106
- [9] Zhu Z X, Jutan A. Model Identification and Optimal Stochastic Control of a Multivariable Pressure Tank System [J]. *Trans of Institution of Chemical Engineers*, 1994, 72(A): 64-77.

(上接第 818 页)

参考文献(References)

- [1] Arras K O, Tomatis N, Jensen B, et al. Multisensor on-the-fly Localization: Precision and Reliability for Applications [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2001, 34(2-3): 131-143
- [2] Jensfelt P, Christensen H I. Pose Tracking Using Laser Scanning and Minimalistic Environmental Models [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2001, 17(2): 138-147.
- [3] Tomatis N, Nourbakhsh I, Siegwart R. Hybrid Simultaneous Localization and Map Building: A Natural Integration of Topological and Metric [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 44(1): 3-14
- [4] Zhuang Y, Wang W, Liu L, et al. Mobile Robot Indoor Map Building and Pose Tracking Using Laser Scanning [A]. *Proc of Int Conf on Intelligent Mechatronics and Automation* [C]. Chengdu, 2004: 656-661.
- [5] Tomatis N, Nourbakhsh I, Siegwart R. A Hybrid Approach for Robust and Precise Mobile Robot Navigation with Compact Environment Modeling [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Seoul, 2001: 1111-1116