

基于混合环境模型的自主移动机器人环境探索研究^①贾松敏^② 沈红敏^③ 李秀智 王 可

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

摘 要 针对未知室内环境,提出了一种基于度量-拓扑混合式地图的高效的自主移动机器人环境探索策略:移动机器人根据当前传感器数据实时构建环境通路点拓扑地图,对各个环境通路点进行细致分析与处理,选择最优的即时目标点作为规划的探索方向;在 Rao-Blackwellized 粒子滤波(RBPF)框架下,将基于栅格地图的同步定位与地图创建(SLAM)算法引入到机器人自主探索任务中,提供准确的机器人位姿估计,以有效改善拓扑节点的位置精度,保证机器人顺利完成探索任务。基于上述策略提出的环境探索算法能够兼顾探索效率与精度。通过在配有激光测距仪的 Pioneer3-DX 型移动机器人平台上进行现场实验,有力验证了这种探索算法的有效性及其实用性。

关键词 移动机器人, 环境探索, 通路点, Rao-Blackwellized 粒子滤波(RBPF), 同步定位与地图创建(SLAM)

0 引 言

移动机器人在完全未知环境中可靠运行的前提是具有自主探索环境的能力,即机器人根据自身携带的传感器设备获取环境信息,基于某种探索策略构建完整的或近似完整的环境地图,继而指导机器人在未知区域不断拓展,直至完全遍历^[1]。近年来,自主移动机器人探索环境的研究逐渐受到关注。Yamauchi 提出基于边界(frontier)的环境探索策略,即将已知与未知区域的交界定义为边界,控制机器人向距离最近的边界运动,保证机器人不断进入未探测区域^[2];Oriolo 等采用基于传感器的随机树(sensor-based random tree, SRT)探索方法,将随机选择提取的边界作为下一步的探索目标点^[3];Konolige 等提出了基于混合栅格和拓扑地图的探索策略^[4],机器人首先遍历未知环境建立全局环境拓扑图,进而利用已知拓扑图完成全局探索,同时,在局部的栅格地图上进行局部探索;Ge 等采用同步路径规划与拓扑建图(simultaneous path planning and topological mapping, SP²ATM)的环境探索算法^[5],以可通行空间树(admissible space tree, AST)描述局

部环境中机器人可自由运动的区域,利用分层拓扑图(hierarchical topological map, HTM)表示全局环境信息,以解决机器人在未知环境中的探索问题。这些方法具有一定的优越性,但探索的过程中拓扑地图难于构建,且自定位误差会制约移动机器人实现自主探索,在位置精度要求较高的场合中,机器人探索任务难以完成。

针对上述问题,本研究设计并实现了一种基于混合环境模型的高效的环境探测策略。由于的环境模型由栅格与拓扑模型组合而成,有效控制了大规模环境下栅格地图表示的空间复杂度和计算复杂度,同时拓扑信息有利于机器人探索任务的完成^[6-8];由于采用了基于环境通路点的拓扑图构建方法,机器人根据当前传感器数据实时构建环境拓扑地图^[9],有效提高了环境探索效率。同时,将基于栅格地图的 Rao-Blackwellized 粒子滤波-同步定位与地图创建(RBPF-SLAM)算法引入到机器人自主探索任务,通过粒子滤波不断更新机器人的位置估计,有效提高拓扑节点的位置精度,进而防止因位置误差不断累积导致的机器人作业失败,保证机器人顺利完成探索任务。

① 国家自然科学基金(61175087, 61105033),北京市自然科学基金(B类, KZ201110005004)和国家教育部留学回国人员科研启动基金(第40批)资助项目。

② 女,1964年生,博士,教授;研究方向:智能服务机器人及其关键性技术,机器人分散控制,计算机视觉等;E-mail: jsm@hjut.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: shen.hongmin@yahoo.com.cn
(收稿日期:2012-09-13)

1 环境通路点拓扑图的构建

在机器人的环境探索过程中,由局部栅格地图提取当前拓扑节点所包含的环境通路点集合,并通过临近空间范围内环境通路点的匹配处理实现拓扑地图的更新与扩张,最终完成整个大规模未知环境的遍历及地图创建。

1.1 环境通路点的提取

移动机器人自主探索的前提是可以根据传感器信息自主进行环境地图构建,并根据地图信息生成具有序列性的运动目标来指导机器人对整个未知环境进行遍历^[2,9]。本研究中机器人通过对周围环境信息的分析处理,获得用于指导机器人探索的通路点,这些通路点作为环境探索的候选目标点。环境通路点的提取过程如下:

(1) 依据当前激光测距仪数据将观察到的环境区域按距离信息划分为 M 个无障碍区间 ($C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_M$) 和 $N - M$ 个障碍物区间 ($C_{M+1}, \dots, C_j, \dots, C_N$), N 为总的区间个数;

(2) 机器人并非质点,因此考虑机器人的自身尺寸 (w_r 为机器人的宽度) 后求出任意无障碍区间内机器人可以自由运动的空间 $W_i (1 \leq i \leq M)$ ^[10];

(3) 在 W_i 区间内,将通路点 $P_i (1 \leq i \leq M)$ 定义为距离机器人最远处的弧线中心点,它描述了在当前激光扫描范围内机器人可以通行并能拓展到的最远区域。

图1中三角形阴影区域代表障碍物,虚线包围的区域为机器人可以自由运动空间,圆点为提取出的当前环境通路点。

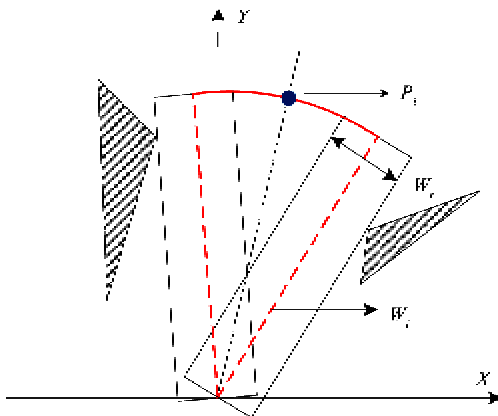


图1 环境通路点示意图

1.2 环境通路点拓扑图的动态维护

实际应用中,为便于通路点拓扑图的构建与维

护,拓扑节点 T 按如下结构存储:

$$T = (P_i, E_l, V_r) \quad (1)$$

P_i : 归属于拓扑节点 T 的环境通路点 ($i = 1, 2, \dots, N$; N 为 T 所含通路点个数);

E_l : 拓扑节点 T 的类型 ($l = 1, 2$)。如果 $l = 1$, 则表示 T 不含通路点; $l = 2$, 则说明 T 至少含一个通路点;

V_r : 拓扑节点 T 在环境中代表的一个虚拟区域范围。

机器人自主环境探索过程持续进行,新环境通路点不断被提取,这就要求对拓扑图中的通路点不断进行添加、绑定与删除等动态维护操作^[1,5]。

假设 S 为任意已生成的拓扑节点,其通路点集合为 ($Q_1, Q_2, \dots, Q_j, \dots, Q_N$); 当前拓扑节点为 T , 通路点集合为 ($P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_M$), 其中 N, M 分别为 S, T 所含通路点个数。具体动态维护规则如下:

(1) 拓扑节点 T 所属区域 V_r 内的通路点 P_i 对机器人探索的作用不明显,删除 P_i 。即: $d(P_i, T) \leq V_r$, 则 $T = T/P_i$ 。

(2) P_i 落在已生成的拓扑节点 S 所属区域 V_r , 且 P_i 与 S 间存在可通行路径,删除 P_i 。即: $d(P_i, S) \leq V_r$ 且 $C(P_i, S) = TRUE$, 则 $T = T/P_i$ 。

(3) 若相邻的通路点 P_i, Q_j 间无障碍物,且距离在阈值 σ 内,保留其中最利于机器人探索的环境通路点。即: $d(P_i, Q_j) \leq \sigma$ 的情况下,若 $d(P_i, T) \geq d(Q_j, S)$, 则 $T = T/P_i$; 否则 $S = S/Q_j$ 。

(4) 机器人探索过程中,需要对某些满足条件的通路点重排列以保证有效的环境探索。即: $d(Q_j, T) \leq d(Q_j, S)$ 且 $C(Q_j, T) = TRUE$, 则 $S = S/Q_j, T = T \cup Q_j$ 。

(5) 若机器人运动到 Q_j 附近,且 Q_j 与 T 间不存在障碍物,表明 Q_j 所代表未知区域已被探索,直接删除 Q_j 。即: $d(Q_j, T) \leq V_r$ 且 $C(Q_j, T) = TRUE$, 则 $S = S/Q_j$ 。

动态维护操作可以保证搜索的实时性和环境探索的高效性,同时提高环境地图的精确性,降低计算的复杂度。

为了更好地表示机器人探索过程中的环境模型,本研究加入度量式栅格地图信息补偿拓扑地图的不足,使得地图表示方法既具有拓扑地图的高效性,又兼顾栅格地图的精确性。同时,栅格地图还用于解决机器人自主探索过程中的定位问题。

1.3 定位算法

SLAM 问题所需要解决的是计算机器人位姿及环境地图的联合后验概率密度分布^[11,12]:

$$p(x_k, m | z_k, u_k) \quad (2)$$

其中,机器人当前位姿为 $x_k = [x_k, y_k, \theta_k]^T$, 地图表示为 $m = [x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n]^T$, 观测序列为 $z_k = [z_1, z_2, \dots, z_k]^T$, 控制输入量为 $u_k = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$ 。

应用 RBPF 粒子滤波器求解 SLAM 问题可转化为将联合后验概率分布分解为机器人路径部分以及以机器人路径为条件的地图部分^[13,14], 即

$$\begin{aligned} p(x_k, m | z_k, u_k) &= p(x_k | z_k, u_k) p(m | x_k, z_k, u_k) \\ &= p(x_k | z_k, u_k) \prod_{i=1}^m p(m_i | x_k, z_k, u_k) \end{aligned} \quad (3)$$

从而可根据机器人运动模型完成位姿估计, 即定位, 在此基础上准确建立全局环境地图, 联合后验概率的计算效率也因此得到提高。

在机器人探索过程中, 激光传感器获得的环境信息通过贝叶斯迭代更新后作为 RBPF-SLAM 的观测输入, 结合机器人内部里程计数据, 不断更新机器人的位置估计, 有效提高拓扑节点的位置精度, 保证机器人顺利地完成任务。单步 SLAM 流程如图 2 所示。

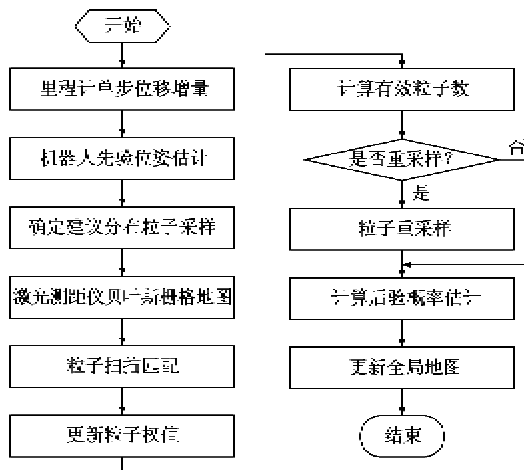


图 2 单步 SLAM 流程图

2 自主移动机器人探索算法

评价一个环境探索策略的标准是该策略能否使得移动机器人最短时间内实现最大空间范围环境的感知, 同时构建出完整或近似完整的环境地图^[1]。本研究采用基于环境通路点的拓扑地图创建方法,

综合考虑路径优化、获得未知信息量多少、运动位置间的连续性等因素, 完成机器人在未知环境下的全局探索以及面向目标点的探索。

2.1 全局探索策略

未知环境中的机器人自主探索, 需要根据激光传感器信息确定每步的最优通路点, 作为机器人每次运动规划的实时目标点, 以保证机器人顺利完成全局遍历, 算法具体步骤如下:

- 1) 整个环境中均不存在尚未探索的通路点的情况下, 若 $d(T, O) \leq \sigma$, 探索终止; 否则机器人回溯到初始点 O , 其中 T 为当前拓扑节点, O 为初始点。
- 2) 当前时刻提取的环境通路点可能会有多个, 借用效用函数

$$U(P) = \frac{G(P) \times L(P) \times e^{-\Delta\theta(P)}}{D(P)} \quad (4)$$

这一评价标准, 计算各个通路点的效用值, 并选取效用函数值最大者作为即时目标点^[9], 同时添加当前拓扑节点 T 并更新拓扑地图。式中 P 为候选通路点, $G(P)$ 表示 P 处机器人所能观测到的未知环境面积大小, $D(P)$ 为机器人当前位置与 P 的距离, $L(P)$ 为 P 处相邻障碍物之间机器人可通行路径的宽度, $\Delta\theta(P)$ 为 P 所指示的未探索区域方向 θ_p 与当前机器人朝向角 θ_r 之间差值的绝对值。

- 3) 当前拓扑节点 T 类型为 E_1 的情况下, 若环境中存在尚未探索的通路点, 则机器人回溯到最近的尚未探索的拓扑节点 S 处; 否则返回 1)。若当前拓扑节点 T 类型为 E_2 , 返回 2)。

当机器人需要回溯到拓扑节点 S 时, 可以根据已探索过的环境信息求出可以直接到达的距离拓扑节点 S 最近的拓扑节点 K , 向之运动; 当机器人到达 K 后, 继续选取可视且距离 S 更近的拓扑节点并向之运动, 随着拓扑节点的不断选取, 最终到达需要回溯的拓扑节点 S 处。

2.2 面向固定目标点探索策略

在某些情况下基于特定的任务, 希望机器人自主到达一个固定位置, 因此提出面向固定目标点的探索策略, 算法具体步骤如下:

- 1) 若 $d(T, G) \leq \sigma$, 则机器人停止运动, 任务中止。其中 T 为当前拓扑节点, G 为目标点。
- 2) 若 $C(T, G) = \text{TRUE}$, 即拓扑节点 T 与目标点 G 之间存在可通行路径, 则机器人直接向 G 运动。
- 3) 根据以下公式从当前生成的多个候选通路点中选取最优通路点 P_i 作为即时目标点。

$$\min_{0 < j \leq m} \{ \min_{0 < i \leq n} \{ d(T, P_i) + d(P_i, G) + d(T, S_j) \} \} \quad (5)$$

若当前拓扑节点类型为 E_2 , 机器人直接向最优通路点 P_i 运动, 返回 1); 否则机器人回溯到最近的尚未探索的拓扑节点 S 处, 返回 1)。

在提取环境通路点的过程中, 虽然有些区域也可以提取出相类似的环境通路点, 但由于其所指示的区域是一些面积有限的封闭或者半封闭区域, 因此这些通路点在机器人面向目标点探索的过程中并不被探索。

3 实验结果

本研究采用 MobileRobots 公司的 Pioneer3-DX 型室内移动机器人作为实验平台。移动机器人所获取的外部环境信息主要来源于机器人所配备的 URG-04LX 型激光测距仪。

3.1 人机交互界面

为了便于机器人控制, 本研究开发了如图 3 所示的基于人性化结构的人机交互界面, 用户可以通过界面远程控制机器人, 同时将机器人自身位置信息及传感器信息反馈给用户, 保证机器人自主探索任务顺利完成。

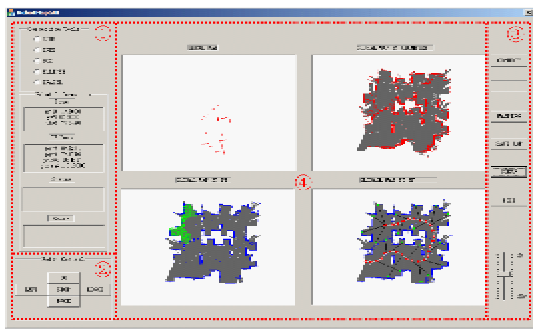


图3 人机交互界面

人机交互界面包括 4 部分: (1) 地图信息显示与修改模块; (2) 机器人控制模块; (3) 上下位机通讯模块; (4) 地图显示模块。用户通过该人机交互界面对移动机器人进行实时控制。

3.2 SLAM 定位实验

实际实验中, 真实环境如图 4(a) 所示, 图 4(b) 为实验环境的二维几何模型。为验证采用的定位算法的有效性, 做了如下两组实验。机器人的初始位置以及停止位置都在二维几何模型的 A 处, 机器人

按固定路径 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$ 行走, 同步递增值生成全局地图。

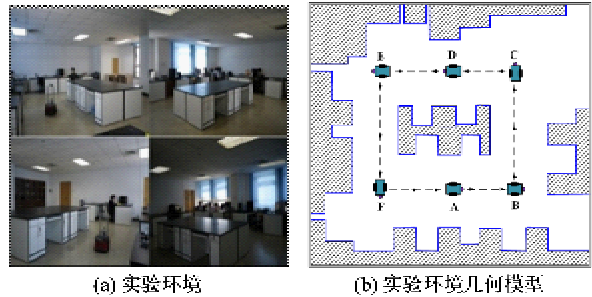


图4 实验环境

实验结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 为仅由机器人里程计提供的数据实时创建的全局环境地图。图 5(b) 为利用粒子滤波算法对里程计位姿校正后实时创建的全局环境地图。

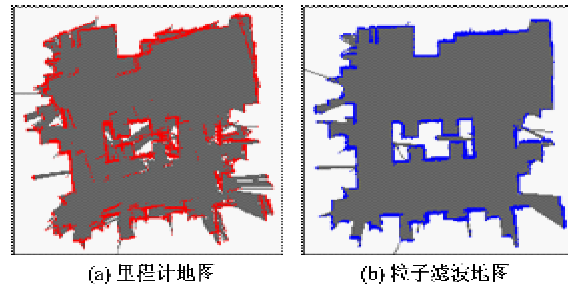


图5 RBPF-SLAM 实验结果

从实验结果明显看出, 由于里程计存在累积误差, 创建的全局环境地图整体变形且细节混乱, 而通过 RBPF 粒子滤波算法创建的全局环境地图清晰、准确且一致性好, 有力验证了定位算法的有效性。

3.3 全局探索结果

为验证移动机器人完全未知环境中全局探索的有效性, 进行如下实验: 激光扫描周期为 2s, 机器人的角速度和线速度分别为 50mm/s 和 150mm/s, 机器人初始位置设置于实验环境二维几何模型的 F 处。全局探索实验结果如图 6 所示。其中, 红色实心圆点为拓扑节点, 由拓扑节点依次连接形成的曲线为机器人的行走路径。

从实验结果可以看出, 在比较复杂的环境中, 利用本文提出的全局环境探索策略能够使机器人有效遍历整个未知环境, 没有发生局部死锁现象, 且路径重复率较低, 有力验证了全局探索方案的正确性和可行性。

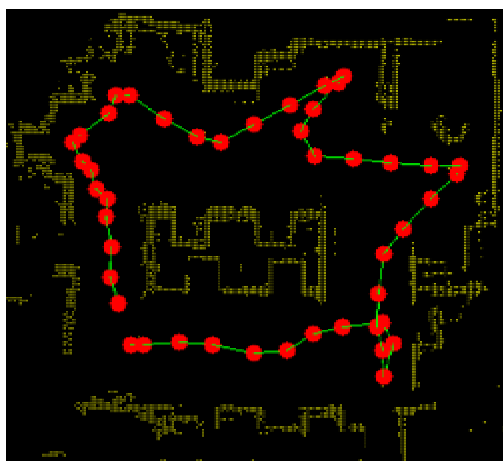


图6 机器人全局探索结果

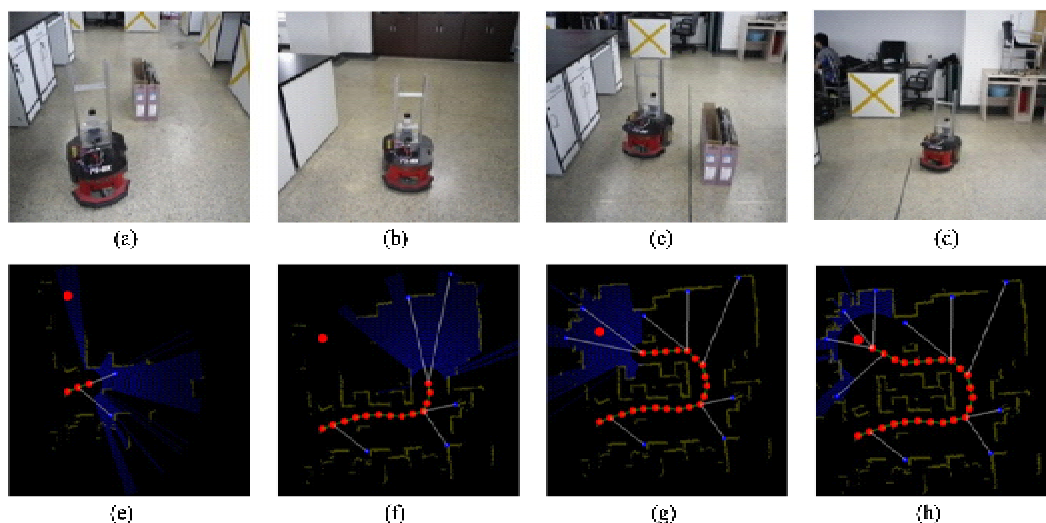


图7 机器人面向目标点的探索结果

4 结 论

本文重点研究了未知环境下的移动机器人自主环境探索问题。由栅格与拓扑地图组合而成的环境模型,有效改善了大规模环境下栅格地图表示的空间和计算复杂度。采用基于环境通路点的拓扑地图创建方法,同时综合考虑路径优化、获得未知信息量多少以及运动位置间的连续性等因素,在递增的拓扑地图上规划机器人的探索路径,有效提高了环境探索效率。将基于栅格地图的 RBPF-SLAM 算法引入到机器人自主探索任务中,提供准确的机器人位姿估计,有效改善了拓扑节点的位置精度,保证机器人顺利完成探索任务。实机实验验证了本研究提出

3.4 面向固定目标点的探索

为验证移动机器人面向固定目标点探索算法的有效性,进行如下实验:机器人的初始位置同样在二维几何模型的处,目标点在位置正上方 4m 处。图 7 中(a)、(b)、(c)、(d)为不同时刻的实验场景图,(e)、(f)、(g)、(h)为相对应的探索结果图。其中,拓扑节点两侧遗留的蓝色实心圆点为未探索的环境通路点。

实验结果如图 7 所示,机器人向固定目标点自主运动的过程中,在激光的每个采样周期从当前多个候选通路点中选取最优通路点作为即时目标点并向之运动,拓扑节点依次连接形成的机器人行走的最优路径,说明了面向目标点探索方案的有效性和实用性。

的全局探索方案的可行性和正确性以及面向固定目标点探索方案的有效性和实用性。进一步改善全局环境探索的评价函数以提高全局探索的效率与环境适应性,是下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] 张明状, 庄严, 王伟等. 移动机器人及环境探索与地图库构建. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(增 I): 111-115
- [2] Yamauchi B. A frontier-based approach for autonomous exploration. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Monterey, USA, 1997. 146-151
- [3] Oriolo G, Vendittelli M, Freda L, et al. The SRT method: randomized strategies for exploration. In: Proceed-

- ings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, USA, 2004. 4688-4694
- [4] Konolige K, Marder-Eppstein E, Marthi B. Navigation in hybrid metric-topological maps. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, Beijing, 2011. 3041-3047
- [5] Ge S S, Zhang Q, Abraham A T, et al. Simultaneous path planning and topological mapping(SP^2ATM) for environment exploration and goal oriented navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(3-4): 228-242
- [6] 余洪山. 移动机器人地图创建和自主探索方法研究: [博士学位论文]. 湖南:湖南大学电气与信息工程学院, 2007. 77-83
- [7] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W. Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters, *IEEE Trans Robotics*, 2007, 23(1): 34-46
- [8] Lai X C, Ge S S, Abraham A T. Hierarchical incremental path and motion planning for differential steering mobile robots considering accelerations for forward and turning speeds. *IEEE Trans SMC*, 2007, 37(6): 1541-1554
- [9] 张明状. 移动机器人室内环境自主探索与认知: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学控制科学与工程学院, 2009. 15-22
- [10] Abraham A T, Ge S S, Tao P Y. A topological approach of path planning for autonomous robot navigation in dynamic environments. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Louis, USA, 2009. 4907-4912
- [11] 郭剑辉, 赵春霞, 陆建峰等. Rao-Blackwellised 粒子滤波 SLAM 的一致性研究. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6401-6405
- [12] 杜航原, 郝燕玲, 高忠强等. 基于鲁棒非线性卡尔曼滤波的自适应 SLAM 算法. 宇航学报, 2012, 33(5): 620-627
- [13] Li M H, Hong B R, Luo R H. Mobile robot simultaneous localization and mapping using novel Rao-Blackwellised particle filter. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 16(1): 34-39
- [14] Barron-Gonzalez H, Dodd T J. RBPF-SLAM based on probabilistic geometric planar constraints. In: Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Intelligent Systems, London, Britain, 2010. 260-265

Research on autonomous robots' environment exploration based on hybrid environment model

Jia Songmin, Shen Hongmin, Li Xiuzhi, Wang Ke

(College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract

For exploring the interior unknown environment, by using an autonomous mobile robot this paper proposes a high-effect autonomous environment exploration algorithm based on a hybrid topological-metric map. The topological map based on environment Opening-Points is built in real-time according to current sensor information. The optimal instant target is selected as the exploration direction for the next step by analyzing and dealing with the Opening-Points. In the framework of Rao-Blackwellized particle filter(RBPF), the grid map based Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) is introduced into the autonomous exploration process of the mobile robot, which provides the accurate position estimate to improve the position accuracy of the topological node effectively and complete the exploration task smoothly. The exploration algorithm based on the above two strategies gives consideration to both accuracy and efficiency. The validity and practicability of the proposed exploration approach was validated by a lot of experiments on the mobile robot Pioneer3-DX.

Key words: mobile robot, environment exploration, opening-points, Rao-Blackwellized particle filter (RBPF), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)