

文章编号: 1002-0446(2007)01-0018-05

多简单机器人协作覆盖规划研究*

郝宗波, 洪炳镕

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究了多简单机器人协作覆盖的问题. 针对简单机器人只能用接触传感器感知外部环境的局限性, 提出了基于栅格地图表示法的多机器人内螺旋覆盖算法进行在线覆盖规划. 该方法通过对部分区域的重复覆盖和设置 GATE 栅格实现了对环境的完全覆盖, 同时该方法保证了只要有一个机器人不出现故障就可以完成覆盖, 提高了系统稳定性. 最后用仿真试验验证了该方法的可行性.

关键词: 多简单机器人; 覆盖算法; 完全覆盖; 稳定性

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

On Cooperative Coverage Planning by Multi-simple-robot

HAO Zong-bo HONG Bing-rong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Cooperative coverage by multi-simple-robot is discussed. For online coverage planning, a Multi-robot Internal Spiral Coverage algorithm based on grid map is presented to overcome the sensing limitation of simple robot that can sense the environment only by contact sensors. The algorithm guarantees complete coverage by repeating covering portion of the environment and setting the GATE grids. The algorithm improves system stability in the sense that coverage can be completed if only one robot is not in catastrophic failure. Simulation experiment proves the feasibility of the algorithm.

Keywords multi-simple-robot; coverage algorithm; complete coverage; stability

1 引言 (Introduction)

机器人的许多应用领域需要用到覆盖算法, 如探测地雷、清扫地面、创建地图等. 这些应用领域要求机器人 (或机器人的探测器) 覆盖环境中的所有未被障碍物占据的区域. 在未知环境中, 机器人必须利用自身携带的传感器感知环境并规划覆盖路径, 该任务被称为基于传感器的覆盖任务^[1]. 多机器人系统由于其并行性, 可以提高系统效率, 缩短完成任务的时间, 并且在单个机器人出现故障时其它机器人仍能完成任务, 从而提高了系统稳定性, 因此多机器人覆盖任务的研究越来越受到人们的关注.

多机器人覆盖任务根据对环境知识的了解可分为离线和在线规划两种. 离线规划中机器人预先知道环境地图, 因此在开始覆盖之前将覆盖任务和运动路径规划好并分配给各机器人, 如文 [2]. 文 [2] 是在单机器人 STC (spanning tree covering) 算法的基础

上扩展而来的, 在覆盖之前将以栅格表示的覆盖路径分配给各机器人, 在覆盖过程中各机器人相互通信, 如果某个机器人出现故障停止运动, 其后面的机器人在执行完自己的任务之后接着完成故障机器人的任务. 该文还讨论了机器人起始位置对覆盖效率的影响. 在线多机器人覆盖中, Rekleitis 等人研究了多台具有局部通信能力的机器人的覆盖问题^[3]. 该文用两个在相互可视的情况下才能通信的机器人探索环境并划分覆盖单元, 其它机器人按划分的单元进行覆盖. Wagner 等人研究了类蚁群算法的多机器人覆盖问题^[4]. 他们假设机器人在地图上留下类似于昆虫信息素的信息进行通信, 协调各机器人共同完成任务. 在这些研究中, 机器人都配备外部传感器, 可以感知一定范围内的环境, 或环境地图已知, 对于未知环境下的简单机器人覆盖并不适用. 简单

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (863-2002AA735041).

收稿日期: 2006-03-19

机器人是指只配备接触传感器和内部测距传感器的机器人^[5]. 本文针对简单机器人提出了多机器人内螺旋覆盖算法 (Multi-robot Internal Spiral Coverage, MISC). 该算法是在作者提出的内螺旋覆盖 (Internal Spiral Coverage, ISC) 算法的基础上实现的.

2 ISC 算法简介 (ISC algorithm)

ISC 算法用简单圆形机器人覆盖环境, 该算法是基于栅格地图的在线覆盖算法, 算法假设机器人全局坐标可以由机器人内部测距传感器 (里程计) 精确得出. 在覆盖过程中 ISC 算法分为两个阶段: 边界探索阶段和在线覆盖阶段. 在边界探索阶段, 机器人从环境的任一顶点开始, 采取右侧沿环境边界行走的方式运动一周. 在探索过程中, 将机器人右侧接触传感器所在栅格赋值为 0 表示该栅格无法覆盖, 将机器人走过的栅格赋值为 1 表示该栅格已被覆盖, 将机器人左侧栅格赋值为 2 表示下一圈要覆盖的栅格, 即在线规划的覆盖路径. 因此, 当边界探索阶段结束之后, 环境边界已经获得, 机器人完成了边界附近的一圈覆盖, 并规划了下一圈的运动路径, 之后进入在线覆盖阶段.

在线覆盖阶段, 机器人沿着上一圈生成的值为 2 的连续栅格运动, 在运动过程中将已走过的值为 2 的栅格赋值为 1, 将机器人左侧未赋值的栅格赋值为 2. 当第二圈覆盖结束时第三圈的覆盖路径已经生成, 机器人以此方式向内螺旋完成所有区域的覆盖.

如果环境内部有障碍物, 则障碍物会阻断规划的路径, 导致值为 2 的栅格不连续, 但该障碍物在下一圈的覆盖过程中必将被机器人前面的接触传感器检测到, 机器人仍然采取右侧沿物体边界行走的方式绕着障碍物运动, 直到前方重新出现值为 2 的栅格, 机器人回到原规划路径上继续原来的覆盖.

对于常见的单个矩形环境, 应用上述方法可以从环境边界向内螺旋完成完全覆盖, 但对于多个房间组成的复杂环境, 会在每个房间的入口处出现问题. 因为房间的入口处比两侧的空间都窄, 如图 1 所示, 因此当入口处两侧都还有未覆盖区域时, 该狭窄区域先完成覆盖, 因此引入 GATE 栅格的概念.

定义 1 如果欲将某栅格赋值为 2 时该栅格已被赋值为 1 或 2 且该栅格左侧前后都有尚未被覆盖的栅格 (值为 2 的栅格), 则称该栅格为 GATE 栅格.

在图 1 中, 当机器人沿 MN 从房间 B 进入房间 A 欲将 PQ 段赋值为 2 时, PQ 段已在机器人上一圈运动时被规划, 已被赋值为 2 因此在 PQ 段设置 GATE

栅格, 然后对房间 A 进行完全覆盖. 如果不定义 GATE 栅格, 则机器人会在覆盖完 OQ 之后先覆盖 QP 并将其赋值为 1 打断了房间 A 、 B 未覆盖部分的连通性, 导致机器人无法再进入房间 A 进行覆盖. 因此当出现一个 GATE 栅格时, 机器人记录该栅格的位置, 先完成 GATE 栅格某一侧的覆盖, 当 GATE 栅格该侧不存在值为 2 的栅格时, 表明该侧已完全覆盖, 机器人回到 GATE 处继续另一侧的覆盖, 直到所有环境中没有值为 2 的栅格, 表明已完成了完全覆盖, 算法结束.

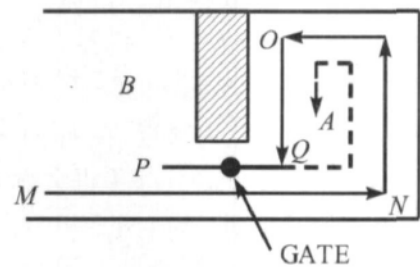


图 1 GATE 栅格

Fig 1 GATE grid

3 多机器人内螺旋覆盖算法 (MISC algorithm)

在多机器人覆盖任务中, 各机器人共享环境地图, 即所有机器人都把自己已覆盖的和规划的栅格信息与其它机器人共享. 设由 k 个机器人共同完成环境的覆盖.

3.1 多机器人协作覆盖边界探索

设 k 个机器人随机分布在环境边界上, 右侧沿边界同时运动并记录环境信息. k 个机器人将环境边界分为 k 段, 记最短的那段为第 m 段, 由机器人 m 探索. 当机器人 m 运动至第 $m+1$ 个机器人的初始位置处时, 会在共享地图中发现前方的栅格已被赋值为 1 同时左前方栅格已被赋值为 2 则机器人 m 结束边界探索阶段, 运动至机器人 $m+1$ 规划的第二圈栅格上开始在线覆盖阶段, 同样其它机器人都在运动至下一个机器人的初始位置处转为在线覆盖阶段, 并沿着下一个机器人规划好的路径运动.

3.2 多机器人在线覆盖

进入在线覆盖阶段之后, 每个机器人 (以第 m 个机器人为例) 都会沿着下一个 (第 $m+1$ 个) 机器人上一圈规划好的路径运动, 同时为上一个 ($m-1$) 机器人规划下一圈的运动路径, 直至完成整个环境的完全覆盖. 当环境内部出现障碍物时同 ISC 算法一

样, 机器人转为右侧沿障碍物边界运动的探索模式, 直到机器人前方重新出现值为 2 的栅格, 机器人又采取在线覆盖模式。

对于不规则形状的环境, 如图 2 所示, 环境某一侧有一枝状凸出, 当凸出区域未覆盖部分的高度 $CD > 3d$ 时 (d 为栅格边长), 规划按上述方法进行. 当 $CD = 3d$ 时, 机器人 m 沿 $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ 覆盖之后未覆盖部分为高度为 d 的一条 T 形“死胡同”, 机器人 $m - 1$ 将沿着该路径运动至顶点 C 处发现周围没有规划的路径, 则 $m - 1$ 在共享地图中搜索离当前位置最近的值为 2 的栅格 (E 点处栅格), 机器人运动到该点继续原来的覆盖. 如果 $CD = 2d$, 机器人 m 沿 $B \rightarrow C$ 到达 C 处时只有 $D \rightarrow E$ 是规划好的路径, 则 m 沿 $D \rightarrow E$ 运动. 如果 $m - 1$ 与 m 距离很近, 在 m 尚未完成 $D \rightarrow E$ 覆盖时 $m - 1$ 就到达 E 处, $m - 1$ 也会沿 $E \rightarrow D$ 运动, 势必与 m 在 DE 段相遇, 这时两个机器人周围都没有规划好的路径可走, 同样机器人搜索离当前位置最近的值为 2 的栅格 (在 E 点下方), 则 $m - 1$ 旋转 180° 沿 $D \rightarrow E$ 后退, m 仍然前进 (为叙述方便, 将机器人 $m - 1$ 和 m 的序号交换, 使得机器人 m 始终在 $m - 1$ 的前方). 当新的机器人 m 到达 E 处时重新回到 $m + 1$ 规划的路径上, 继续覆盖, 机器人 $m - 1$ 也按 m 在线规划的路径运动。

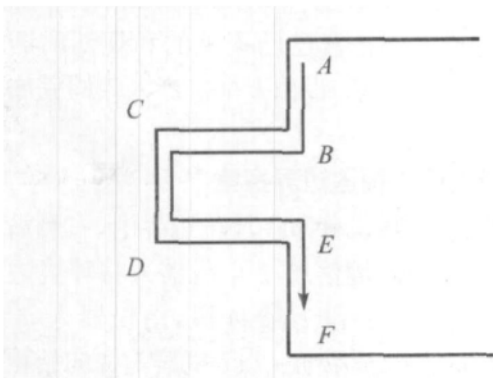


图 2 凸出区域的覆盖

Fig 2 Coverage of convex region

多机器人覆盖中也会在房间的入口处出现先完成覆盖的情况, 因此在这些地方设置 GATE 栅格, 不过每个机器人设置自己独立的 GATE 栅格. 如图 3 所示, 当机器人 m 沿 MN 进入房间 A 时, 将 PQ 段设为 GATE 栅格, 并完成房间 A 的完全覆盖. 机器人 $m - 1$ 沿着 RP 到达 P 点处时, 因为 PQ 段不是值为 2 的栅格, 相反 PS 是上一圈某个机器人离开房间 A 时规划好的路径, 因此机器人 $m - 1$ 沿着 PS 运动. 机器人 m 完成房间 A 的完全覆盖之后回到自己设置的 GATE

栅格, 并按从后向前的顺序对 GATE 栅格覆盖. 如果设置的 GATE 栅格全部覆盖完并且在第一个 GATE 栅格周围找到值为 2 的栅格, 说明机器人 $m - 1$ 与 m 相距较远, 还没有到达 P 处, 则机器人 m 沿 PS 运动即可; 如果在附近没有值为 2 的栅格, 说明机器人 $m - 1$ 已经覆盖了路径 PS 并将其赋值为 1, 则 m 因为找不到路径而停止运动. 因为至少有一个机器人不会因为 GATE 栅格处的路径被其它机器人覆盖而停止运动, 因此 MISC 算法可以完成所有区域的完全覆盖。

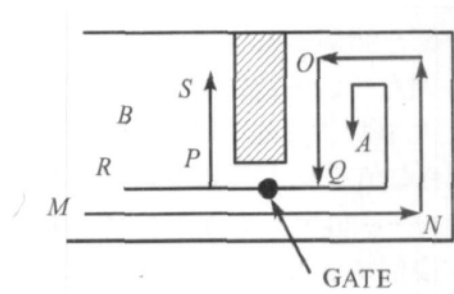


图 3 多机器人覆盖 GATE 栅格

Fig 3 Grid GATE in multi-robot coverage

4 算法分析 (Algorithm analysis)

在算法分析部分主要讨论 MISC 算法的覆盖完全性和系统稳定性。

4.1 覆盖完全性分析

对于常见的矩形环境, MISC 算法可以逐层向内螺旋完成完全覆盖. 当环境内部无障碍物时, 机器人 m 一直沿着 $m + 1$ 规划的路径无重复地运动, 同时为 $m - 1$ 规划下一圈的运动路径, 直到出现 T 形路径或随着覆盖路径向内螺旋出现 GATE 栅格. 由 3.2 节可知, 当出现 T 形路径时, 可以通过机器人 $m - 1$ 和机器人 m 对 T 形路径的部分重复覆盖退出 T 形路径并继续原来的覆盖, 并且机器人 $m - 1$ 为机器人 $m - 2$ 在线规划的下一圈路径不再受 T 形路径的影响, 而是一条直线. 当在空间狭窄区域出现 GATE 栅格时, 机器人 m 进入 GATE 栅格某侧进行覆盖, 同时设置 GATE 栅格阻止其它机器人再进入 GATE 栅格该侧, 因此该狭窄区域及其被机器人 m 覆盖的一侧对于其它机器人可以看作无法访问 (也不需覆盖) 的障碍物, 解决了狭窄区域打断未覆盖路径连通性的问题. 当机器人 m 完成 GATE 栅格一侧和 GATE 栅格的完全覆盖之后, 如果可以找到路径则继续覆盖, 否则停止. 如果环境内部存在未知障碍物, 且机器人 $m + 1$ 在上一圈规划路径时没有检测到, 则该障碍物位于

机器人 m 的运动路径上, 机器人 m 运动到该障碍物处时采用右侧沿物体边界运动的方式绕过该障碍物直到重新回到原路径上, 同时为机器人 $m-1$ 规划的路径直接绕开该障碍物, 不再受障碍物的影响. 因此, 如果不出现故障, 则机器人只在 GATE 栅格处和环境完全覆盖之后找不到路径时停止运动. 但由 3.2 节可知, 至少有一个机器人不会因为 GATE 栅格停止运动. 因此, MISC 算法可以完成环境的完全覆盖.

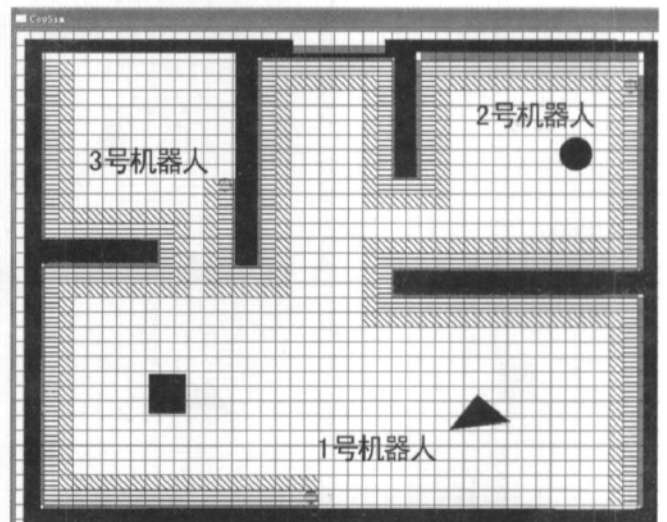
4.2 系统稳定性分析

由于每个机器人在运动过程中都实时规划下一圈覆盖的路径, 将其左侧栅格赋值为 2 并且在覆盖阶段机器人都是沿着值为 2 的栅格路径运动, 因此机器人并不知道自己运动的路径是哪个机器人规划的, 甚至不知道是多个机器人在协作覆盖, 这种好处是显而易见的: 在覆盖过程中如果某个机器人突然出现故障而停止运动, 对其它的机器人无任何影响. 假设机器人 m 在覆盖中停止运动, 那么当机器人 $m-1$ 追上机器人 m 时, 只需将机器人 m 当作障碍物, 右侧沿其绕行并继续执行机器人 m 原来执行的运动路径即可, 机器人 m 对剩下的覆盖任务不再有任何影响. 同理, 在覆盖过程中增加或减少一个机器人也不会对其它机器人造成影响. 因此, 只要不是所有的机器人都出现故障, MISC 算法即可完成环境的完全覆盖, 提高了系统稳定性.

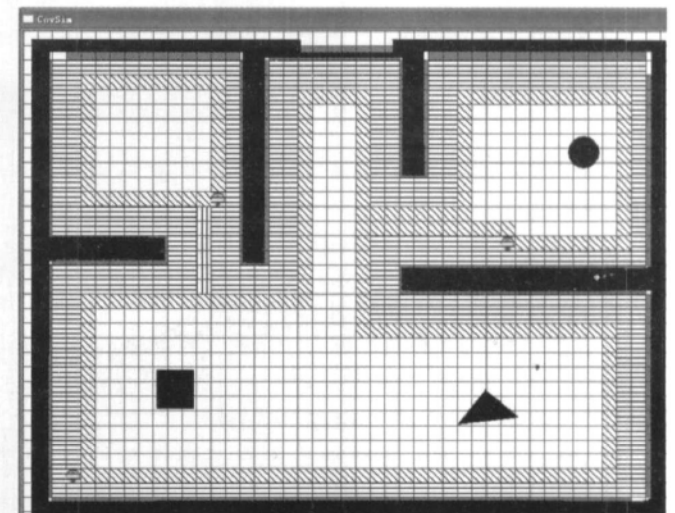
5 多机器人协作覆盖仿真试验 (Simulation test of multi-robot cooperative coverage)

本文在仿真实验平台上仿真了室内环境的多机器人覆盖任务. 本试验用基于颜色识别的方法模拟接触传感器, 即只有当机器人与障碍物接触上 (有像素重叠) 时才能检测到障碍物. 本文环境为 900×700 的矩形房间, 分成 3 个小房间, 房间的入口处比两侧狭窄. 环境内部随机分布少量障碍物, 用 3 个 20×20 的圆形机器人覆盖. 由 3.2 节可知, 两个机器人相距越远, 前边的机器人因 GATE 栅格提前停止运动的可能性越小, 因此尽可能将 3 个机器人均匀分布在环境边界上, 本文中将机器人分布在 3 个墙角处同时开始边界探索. 如图 4(a) 所示, 当 2 号机器人到达 3 号机器人的初始位置时转为在线覆盖阶段. 图中灰色栅格代表障碍物所在栅格, 横线栅格代表已覆盖区域, 斜线栅格代表规划的路径. 在图 4(b) 中, 2 号机器人进入左上角房间并设立 GATE 栅格, 用竖线栅

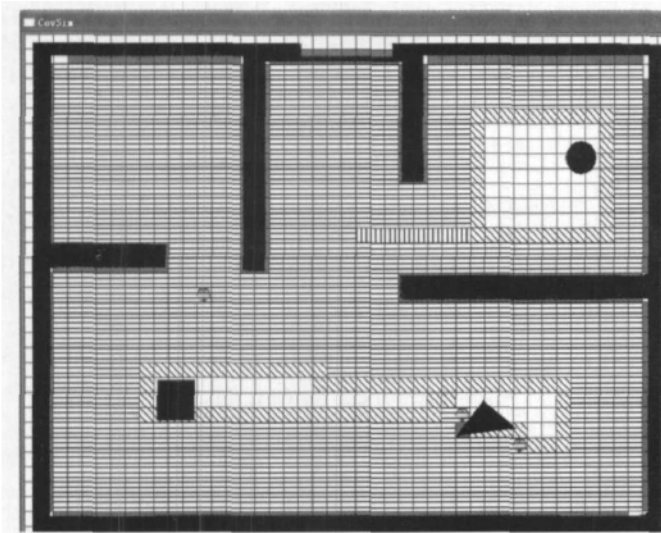
格表示, 先完成左上角房间的完全覆盖, 1 号和 3 号机器人将不再进入该房间. 在图 4(c) 中, 2 号机器人覆盖完左上角的房间和 GATE 栅格之后, 1 号机器人已经将第一个 GATE 栅格附近覆盖, 因此 2 号机器人找不到规划的路径, 停止运动, 并且随着覆盖的进行, 3 号机器人先检测到房间内部的三角形障碍物, 沿着障碍物边界绕行. 图 4(d) 是完全覆盖之后各个机器人的运动轨迹. 黑色实线代表 1 号机器人的运动轨迹, 黑色虚线代表 2 号, 灰色实线代表 3 号机器人. 环境中共有 1117 个可覆盖栅格并被全部覆盖到, 其中 1 号机器人用 493 步完成了 454 个栅格的覆盖, 2 号机器人用 230 步完成了 223 个栅格的覆盖, 3 号机器人用 456 步完成了 440 个栅格的覆盖, 整个系统的覆盖重复率为 5.5%.



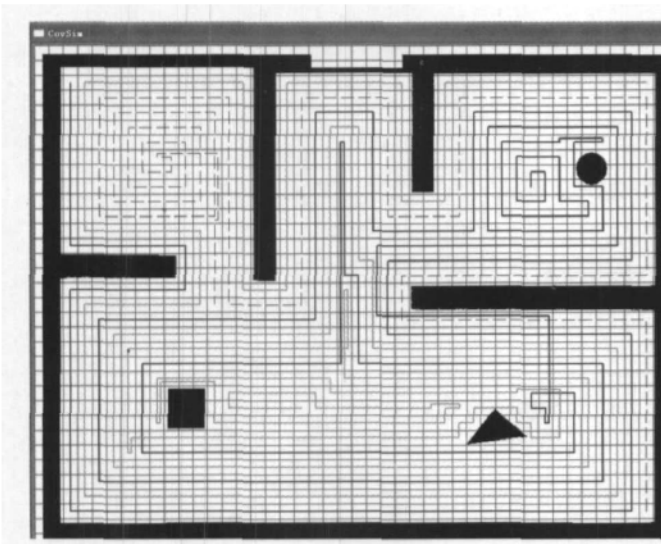
(a) 环境边界探索



(b) 设立 GATE 栅格



(c) 障碍物绕行



(d) 各机器人运动路线

图 4 多机器人覆盖仿真实验

Fig 4 Simulation test of multi-robot coverage

6 结论 (Conclusion)

本文提出了多简单机器人协作覆盖算法——MISC算法,该算法通过对环境部分区域的重复覆盖和设置 GATE 栅格保证了环境的完全覆盖.由于每个机器人在线规划时只利用共享地图而不考虑其它机器人的影响,因此提高了系统稳定性,保证只要有一个机器人不出现故障就能完成环境的完全覆盖.该算法实现简单,适用于配置不高的简单机器人.

参考文献 (References)

- [1] Butler Z, Rizzi A, Hollis R. Contact sensor-based coverage of rectangular environments [A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Intelligent Control/ Intelligent Systems and Semiotics [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1999. 266-271.
- [2] Hazon N, Kaminka G. Redundancy, efficiency and robustness in multi-robot coverage [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2005. 1199-1205.
- [3] Rekleitis I, Lee-Shue V, Peng A, et al. Limited communication, multi-robot team based coverage [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2004. 3462-3468.
- [4] Wagner I, Lindenbaum M, Buckstein A. Distributed covering by ant-robots using evaporating traces [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5): 918-933.
- [5] Rekleitis I, Dudek G, Milios E. Multi-robot exploration of an unknown environment efficiently reducing the odometry error [A]. Proceedings of the 15th International Joint Conference in Artificial Intelligence [C]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1997. 1340-1346.

作者简介:

郝宗波 (1977-), 男, 博士生. 研究领域: 服务机器人, 智能机器人.

洪炳镕 (1937-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 服务机器人, 机器人足球, 虚拟现实.

勘误

因编辑部工作疏漏, 本刊 2006年第 6期目次页出现错误, 第 651页 (作者邹海等) 的标题应为“*AUV 控制系统规划层使命与任务协调方法研究*”, 特此更正, 并向作者及读者致歉.