

文章编号: 1002-0446(2002)02-0171-06

基于包容结构的移动机器人混合式控制结构*

王 于 林良明 颜国正

(上海交通大学精密仪器及微智能研究所 200030)

摘 要: 本文提出以包容式框架结构为基础, 将计划作为一种行为, 与应激式行为并行处理的思想. 与之对应的是将传感器检测区域分为避障区和规划区, 如果在避障区有障碍物, 则由应激避障模块采取相应的避障行为; 如果在规划区有障碍物, 则由规划模块产生相应的输出. 由于规划模块最终输出子目标, 因此使此结构的规划模块具有很好的扩展性. 另外, 在处理应激避障行为和直接规划行为时, 分别提出新的基于传感器的避障和规划方法, 通过机器人路径规划的仿真证明, 这些方法是简洁、有效的.

关键词: 混合式结构; 避障; 基于传感器的旋转法; 规划; 机器人

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

HYBRID ARCHITECTURE OF ROBOT BASED ON SUBSUMPTION ARCHITECTURE

WANG Yu LIN Liang-ming YAN Guo-zheng

(Dept. of Instrument Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract In this paper, we describe a hybrid control architecture based on Subsuming Control Architecture. The planning is regarded as a behavior, and processed synchronistically with the reactive behaviors. Correspondingly, we partition the detected field into an obstacle-avoidance field and a planning field. If an obstacle has been detected in the obstacle-field avoidance, the reactive obstacle-avoidance module processes it, and if an obstacle has been detected in planning field, the planning module process it. The simulations of robot path planning prove that the method can fuse the reactive behavior and the planning behavior perfectly. In addition, we have given a new reactive obstacle-avoidance method and a new planning method based on sensors. These methods are proved simple and effective.

Keywords: hybrid architecture, avoiding obstacle, RBS, planning, robot

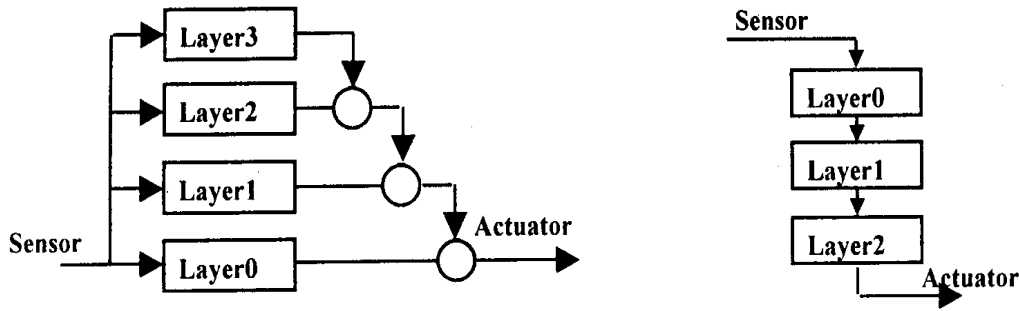
1 引言(Introduction)

路径规划是个开放性课题, 它不但是机器人研究的最基本内容, 而且多机器人协作的许多问题最后都要归结到路径规划问题上. 目前路径规划的研究还有许多期待解决的问题, 其中之一就是如何实现基于行为的结构和基于计划的结构的融和问题. 1986年 R. Brook 提出了基于行为的包容式控制结构^[1], 见图 1(a), 这种结构使机器人反应速度大大加快. 但它也存在一些不足, 比如, 由于它的每个动作都是应激行为, 是在受到外界刺激下才作出的反应, 因此它缺乏自主的运动规划行为, 即智能性较低. 可

以说这种结构速度快是以牺牲优化为代价的. 而基于计划的控制结构, 见图 1(b), 往往应用于环境全部已知或局部已知的情况下. 由一个中心控制器对已知的环境进行推理, 作出长远的、优化的控制策略. 其优点是基于行为的结构所无法替代的, 但其计划过程串行执行, 即使简单的行为也要经过中央控制器, 计划时间长, 反应速度慢. 因此, 越来越多的学者开始研究混合式体系结构. 在混合式机器人体系结构中, 不存在中央控制器, 而是存在多个应激控制器和规划控制器, 规划控制器只起到宏观调控作用, 比如, 制定临时子目标, 分解子任务, 监督机器人运动,

优化路径等. 本文吸取了 R. Brook 的包容式控制结构的思想, 设计了一种混合式机器人控制结构, 将应激行为和规划行为很好的融合在一起. 本系统的另一特点是采用两种传感器: 红外线短距离传感器和超声波传感器长距离传感器, 原因是实际应用中,

超声波传感器很难测得近距离障碍物²¹. 另外, 在处理应激避障行为和直接规划行为时, 分别提出新的基于传感器的避障和规划方法, 这些方法不但能有效避障和规划, 而且更为简洁、迅速.



(a) 包容式结构

(b) 计划型控制结构

图1 两种典型控制结构

Fig. 1 Two kinds of typical control architectures

2 混合式结构 (The hybrid architecture)

R. Brook 提出的基于行为的包容式 (Subsumption) 框架结构, 将机器人分成几个垂直模块, 每个模块响应一个非常有限的行为. 模块之间的作用是固定的, 这些模块并行完成各自的工作, 如果低级模块产生一个结果, 而高级模块不产生结果, 则低级模块的输出被采纳, 如果两个模块有冲突, 那么只有优先级高的模块被考虑. 由于此结构可以任意添加不同优先级的模块, 因此, 采用这种结构构造一个相对复杂的系统成为可能. 本文采用了这种结构, 将应激模块和规划模块作为不同的层, 并行处理, 尽可能的优化机器人的行为. 本文将此混合式结构分为: 漫游层、趋向总目标层、规划层或趋向子目标层、应激避障层和解死锁层. 从下到上的各层中, 越是高层, 优先级越高. 各层具体功能如下:

漫游层: 最低优先级层, 在无任务情况下, 机器人根据传感器选择无障碍物方向随机的动作. 目的是在多机器人化境下, 暂时无任务的机器人同样需要保持清醒的意识和一定的机动性, 避免冲突.

趋向总目标层: 机器人通过通讯方式得到任务, 比如一个最终目的地, 机器人在本层内不断比较当前位置和目标位置, 产生并输出一个指向目标位置的下一步动作. 如果本层有输出, 则表明机器人有新的任务, 停止漫游活动, 开始趋向目标运动.

规划层: 本层又叫子目标层, 主要任务是机器人

利用超声波传感器、已有地图及通讯方式得到较远处环境信息, 使机器人有足够得时间对环境作出推理判断, 对路径作出阶段性规划. 规划结果以子目标的形式输出.

应激避障层: 机器人在运动过程中, 如果红外线传感器测得避障区有障碍物存在, 则机器人暂时停止趋向子目标运动, 实施应激避障行为, 之后重新规划子目标.

解死锁层: 没有一种算法即具有良好的避障行为, 又可以排除所有的死锁行为, 本算法也不例外. 因此, 本层的作用是判断机器人是否进入死锁状态, 如果是, 采用 Follow-wall 行为, 逃离死锁状态. 系统死锁判断方法: 一是系统在 T_{lim} 时间段内速度为 0, 二是机器人运动方向与机器人当前目标 (总目标或子目标) 方向夹角大于 90° ³¹.

从图 2 可以看出, 系统中有多个应激行为, 如: Follow-wall, 应激避障, 趋向总目标, 漫游等, 这些应激行为和规划行为并行处理. 针对规划所需时间相对较长的特点, 可以将规划模块进一步分层, 分成多个较简单的规划模块, 并尽量简化规划算法. 另外, 由于规划层输出的是子目标, 因此即使规划所需时间较应激行为长一点, 对其规划效果影响不大.

2.1 传感器数据处理

Silva. C^[2]认为超声波传感器很难检测到近距离障碍物, 因此, 本结构采用两种传感器, 分别是固定

在机器人前方的 9 个红外线近距离传感器 S_{si} , 测量值为 $d_{Lsi}(i= 0, 1, \dots 8)$ 测量范围 r ; 9 个在相同位置上的远距离超声波传感器 S_{Lj} , 测量值为 $d_{Lj}(j= 0, 1, \dots 8)$, 测量范围 r , 传感器间隔 22.5° , 见图 3. 以往的研究中, 人们往往忽视对传感器测量范围的划分, 一种典型的研究方法是用栅格法^[4]在未知环境下路径规划, 它通常采用小范围传感器, 机器人只判断周围的栅格是否有障碍物, 然后作出下一步动作, 缺乏长远的规划. 与之相类似的还有人工势场法^[5]. 另类典型的运动规划方法是模糊避障方法^[6], 它采用长

距离传感器, 但它没有划分传感器的测量范围, 无论障碍物远近, 一律经过较复杂的模糊推理, 这在实际应用中是不必要的. 本文采用两种不同的传感器, 将测量范围划分为避障区和规划区研究, 在近距离测量范围内叫避障区, 在远距离范围内叫规划区. 规划模块和应激模块分别对传感器数据进行判断, 当障碍物在规划区范围内, 由规划层规划局部最优路径; 当障碍物在避障区范围内, 由应激避障层实时反应, 系统进入应激状态, 同时限制规划层的输出.

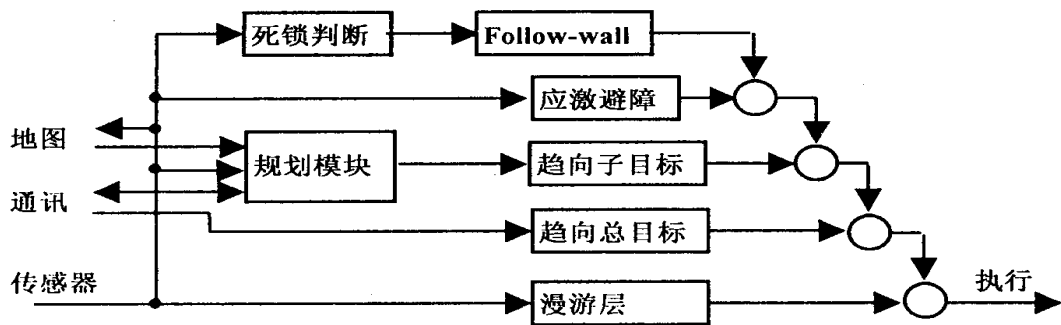


图 2 基于包容结构的混合型控制结构

Fig. 2 The hybrid architecture based on subsumption architecture

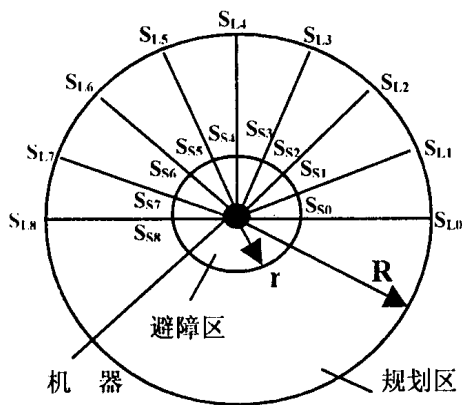


图 3 传感器及区域划分

Fig. 3 The sensors and their ranges

2.2 应激避障层

应激避障层只考虑近距离传感器数据 $S_{si}(i= 0, 1, \dots 8)$. 本层有两个任务, 首先, 判断障碍物是否在避障区, 如果有障碍物在避障区, 即存在 d_{si} 不等于 0, 本层激活; 如果障碍物不在避障区, 本层不被激

活. 其次是应激避障行为选择. 根据传感器数据, 如果测到避障区有障碍物, 机器人应该能根据行为选择机制, 产生应激行为, 比如: 前进、后退、左转、右转. 本文提出一种简单有效的的避障行为选择机制: 基于传感器的旋转法 RBS (Rotate Based on Sensors). 为叙述方便, 将传感器 S_{s0} 到 S_{s3} 称为右侧传感器, 将 S_{s5} 到 S_{s8} 称为左侧传感器. 其基本原理如下: 假设第 i 个传感器测得障碍物, 且此时传感器方向与障碍物方向垂直, 见图 4(a), 如果第 i 个传感器在机器人左侧, 计算它与第 9 个传感器 S_{s8} 方向的夹角 $\theta = (8 - i) \cdot 22.5$, 然后机器人顺时针旋转 θ , 则机器人下一步的运动方向将平行于障碍物, 从而达到避障的效果, 称 $(8 - i)$ 为旋转系数. 如果第 i 个传感器在机器人右侧, 见图 4(b), 计算它与第 1 个传感器 S_{s0} 方向的夹角 $\theta = i \cdot 22.5$, 然后机器人逆时针旋转 θ , 则机器人下一步的运动方向将平行于障碍物, 称 i 为旋转系数.

但实际应用中, 可能几个传感器同时检测到障碍物, 且每个传感器不一定垂直于障碍物, 见图 4(c), 另外考虑到机器人不可能一步达到所需旋转的

角度, 必须分多步才能完成. 因此, 首先将右边和左边所有的旋转系数求代数和, 然后与旋转角速度 ω 相乘, 其结果即为机器人下一步须转过的角度, 再加上机器人当前方向, 即为机器人下一步运动方向, 见公式(1). 式中 ω 是旋转角速度, 在实际应用中或在仿真中, 根据运行情况, 要对 ω 进行适当调整, 因为

ω 过大, 机器人硬件无法满足要求, 过小则机器人可能在未到预定角度前就碰到障碍物, 无法满足避障要求.

$$m\text{-RobotDirection} = m\text{-RobotDirection} + \left(\sum_{i=0}^3 i - \sum_{i=4}^8 (8-i) \right) \omega \quad (1)$$

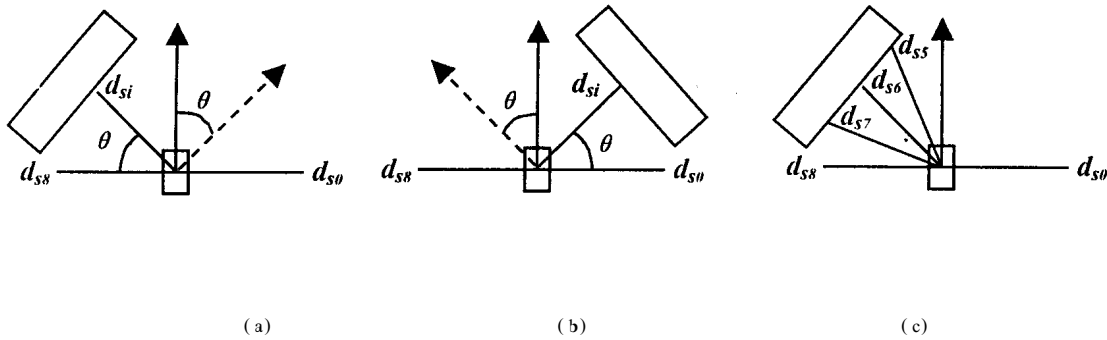


图 4 基于传感器的旋转法原理图

Fig. 4 The principle of the RBS algorithm

2.3 规划机制

规划层是个开放的体系结构, 如图 5 所示. 因为任何任务都应该且必须可分解为多个子目标, 并逐个完成, 因此规划模块可根据不同任务, 分别进行不同设计. 由于本结构提出规划层仅输出子目标, 因此, 它不仅体现了规划的宏观性和阶段性, 而且使规划层与应激行为(趋向目标行为、应激避障行为等)

能很好的协调. 本节首先讨论规划层的结构, 在此基础上, 以规划层的最低层: 直接规划层为例, 说明规划算法及其与应激行为的协调. 规划层输入主要有 3 个: 远距离传感器、机器人记忆的地图、通讯装置, 包括与人的通讯, 机器人之间的通讯. 计划机制内部结构仍以包容式结构为主, 分为协商规划、预测规划、地图规划、直接规划等, 其共同点为只输出子目标.

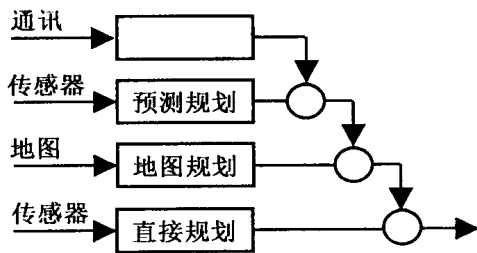


图 5 规划层结构

Fig. 5 The architecture of the planning layer

协商规划: 机器人与其它机器人共同工作时, 可以通过互通信息的形式, 共同制定各自的子目标, 或者由优先级高的机器人给优先级低的机器人强行制定子目标.

预测规划: 主要用于处理动态障碍物(包括其它机器人和非机器人障碍物), 计算动态障碍物运动状态, 预测障碍物运动趋势和可能的碰撞带. 从而根据

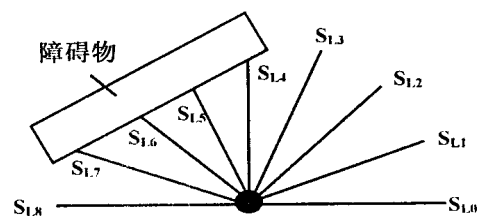


图 6 直接规划图例

Fig. 6 An example of the directly planning

自己的运行情况预测下一个最佳子目标.

地图规划: 需要说明的是, 当机器人在未知环境中运行时, 是不需要地图的. 但是在某些任务中, 比如, 运输任务中, 机器人在发现目标过程中, 探开了部分环境地图, 并进行了记忆, 当机器人返回时, 可以根据已有地图, 进行规划, 得到一条最优路径. 这时机器人的地图规划结果以子目标集合形式输出.

直接规划: 机器人只根据超声波传感器测量值, 直接对路径规划. 假设当前机器人方向为目标方向, 具体步骤如下:

步骤 1: 判断沿机器人方向的传感器(中间传感器) S_{L4} 是否检测到障碍物, 如果没有则不进行规划. 机器人执行“趋向总目标行为”, 且认为这条路径就是当前最佳路径.

步骤 2: 在 S_{L4} 方向如果有障碍物, 则进行寻找子

$$\begin{cases} m. SubgoalAngle = m. RobotDirection - (4 - i) \cdot 22.5, & i < 4 \\ m. SubgoalAngle = m. SubgoalAngle + 360, & m. SubgoalAngle < 0 \\ m. SubgoalAngle = m. SubgoalAngle - 360, & m. SubgoalAngle > 360 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} m. Subgoal \cdot X = m. RobotPosition \cdot X + R/2 \cdot \cos(m. SubgoalAngle \cdot \pi/180) \\ m. Subgoal \cdot Y = m. RobotPosition \cdot Y + R/2 \cdot \sin(m. SubgoalAngle \cdot \pi/180) \end{cases} \quad (3)$$

以图 6 为例, 机器人右侧, 最后一个无障碍物传感器 $i = 3$, 机器人左侧, 最后一个无障碍物传感器 $j = 7$, 由于 $4 - 3 < 7 - 4$, 因此认为, 机器人右侧无障碍物传感器 S_{L3} 的方向更靠近总目标方向, 因此, 选此方向为下一个子目标方向.

目标工作. 从 S_{L0} 到 S_{L3} 找最后一个无障碍物的传感器 S_{Li} , 从 S_{L8} 到 S_{L5} 找最后一个无障碍物的传感器 S_{Lj} , 如果 $4 - i < j - 4$, 说明机器人右侧无障碍物传感器 S_{Li} 的方向更靠近总目标方向, 因此, 选此方向为下一个子目标方向, 并确保此方向在 360° 范围内, 见公式(2). 在此方向上找点 G , 使长度为 $R/2$, 即将 G 作为下一个子目标点, 见公式(3)

同理, 如果 $4 - i > j - 4$, 说明左边无障碍物传感器 S_{Lj} 的方向更靠近总目标方向, 因此, 选此方向为下一个子目标方向, 见公式(4). 在此方向上找点 G , 使长度为 $R/2$, 将 G 作为下一个子目标点, 见公式(3)

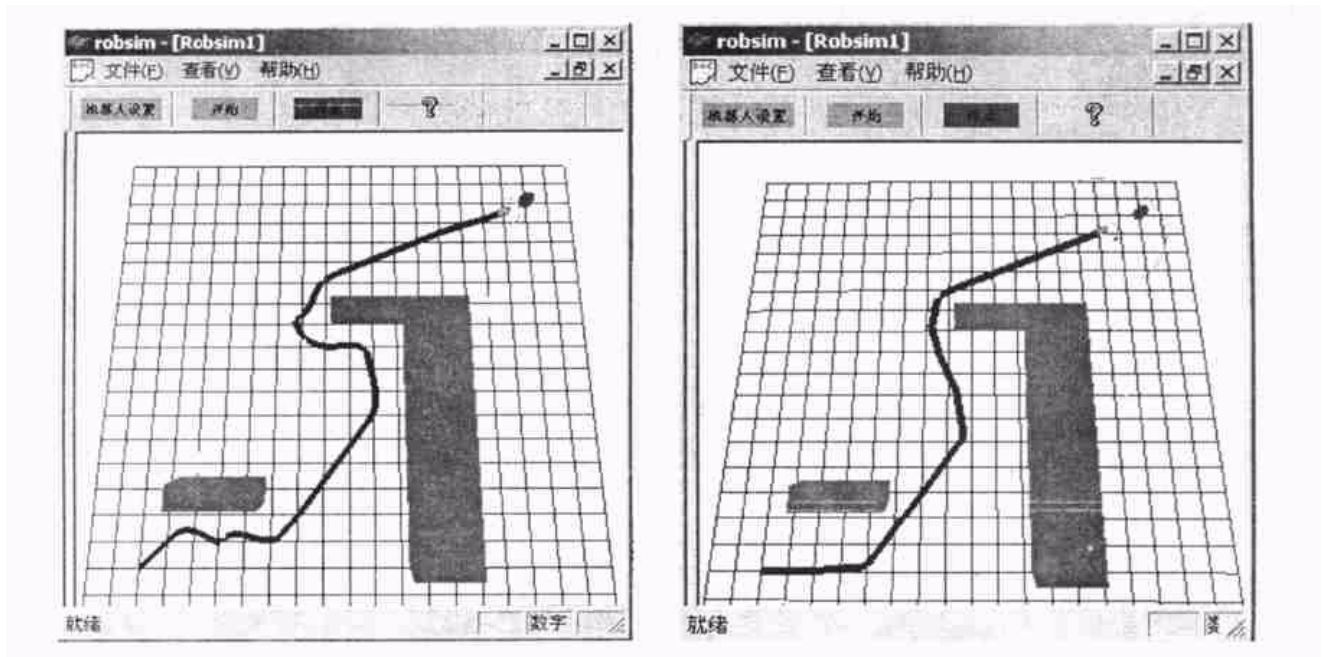
$$\begin{cases} m. SubgoalAngle = m. RobotDirection + (j - 4) \cdot 22.5, & i < 4 \\ m. SubgoalAngle = m. SubgoalAngle + 360, & m. SubgoalAngle < 0 \\ m. SubgoalAngle = m. SubgoalAngle - 360, & m. SubgoalAngle < 360 \end{cases} \quad (4)$$

步骤 3: 如果所有传感器都检测到规划区内有障碍物, 比如 U 型障碍物, 则机器人右转 22.5 , 按上述步骤找子目标点方向, 如果还没有发现子目标点, 则左转 45 , 找子目标点, 如果还没有, 则右转 67.5 , 直到找到出口为止, 或者被 Follow-wall 行为取代.

此规划模块输出的子目标点将暂时取代总目标点, 使机器人向子目标点运动. 在此过程中, 机器人将不再进行子目标规划, 除非机器人已到达子目标点, 或在运行过程中, 有障碍物出现在避障区, 以及有死锁现象, 此时, 机器人将停止趋向子目标运动, 而去执行以上两应激行为. 之后, 机器人执行趋向总目标运动. 如果规划区有障碍物, 则按上述步骤重新规划子目标.

3 仿真实验(The simulation experiments)

本文给定两个障碍物和一个总目标点, 让机器人两种方式走到目标点, 一种方法是基于传感器的旋转法, 机器人只有应激行为, 没有规划行为; 另一种方法是在此基础上加上基于传感器的直接规划方法. 前一个仿真实验证明基于传感器的旋转法是有效的, 见图 7(a). 从规划前后的仿真比较明显看出, 混合式控制结构优于单纯的应激避障结构, 表现出更高的智能性. 从图 7(b) 可以看出, 机器人路径为几种行为的集合, 依次是: 规划行为、规划行为、趋向总目标行为、规划行为、规划行为、应激避障行为、趋向总目标行为.



(a) 应激避障结果

(b) 混合结构避障结果

图7 应激避障与混合结构避障结果比较

Fig. 7 The compare of two kinds of collision-free methods

4 结论(Conclusion)

本文以机器人包容式结构为基础,设计了一个开放的混合式结构,成功地将应激行为和规划行为融合在一起.在处理应激避障行为时,本文提出的基于传感器的旋转法达到了很好的避障效果.本文提出的直接规划算法,通过仿真证明,是可行的、有效的,另外,由于其计算的简单性使规划行为和应激行为并行处理成为可能.

参考文献 (References)

- 1 Brooks R A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2
- 2 Silva C, Crisostomo M, Ribeiro B. MONODA: A neural modular architecture for obstacle avoidance without knowledge of the environment. Neural networks, 2000. IJCNN 2000, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on, 2000, 6: 334- 339
- 3 Johann Borenstein. Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mo-

bile Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(5)

- 4 Seabra Lopes L, Lau N, Reis L P. Intelligent control and decision-making demonstrated on a simple compass-guided robot. Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on, 2000, 4: 2419- 2424
- 5 Kai-Tai Song, Charles C Chang. Navigation Intergration of a Mobile Robot in Dynamic Environments. Journal of Robotic Systems, 1999, 16(7): 387- 404
- 6 Pat-Shih Lee, Ling-Ling Wang. Collision Avoidance by Fuzzy Logic Control for Automated Guided Vehicle Navigation. Journal of Robotic Systems, 1994, 11(8): 743- 760

作者简介:

王 于 (1972-), 男, 博士生. 研究领域: 工业机器人.

林良明 (1938-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 微机器人.

颜国正 (1960-), 男, 教授. 博士生导师. 研究领域: 微机器人.