

文章编号: 1002-0446(2002)05-0475-06

## 移动机器人技术研究现状与未来\*

李磊 叶涛 谭民 陈细军

(中国科学院自动化研究所 复杂系统与智能科学试验室 北京 100080)

**摘要:** 本文综述了智能移动机器人技术的历史、研究现状及未来展望. 对移动机器人的导航和定位、多传感器融合等技术进行了较为详细的分析, 指出了优点与不足. 同时对仿生机器人、多机器人系统与机器人足球等移动机器人技术, 做了进一步的分析.

**关键词:** 导航与定位; 路径规划; 多传感器融合; 多机器人系统与机器人足球

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## PRESENT STATE AND FUTURE DEVELOPMENT OF MOBILE ROBOT TECHNOLOGY RESEARCH

LI Lei YE Tao TAN Min CHEN Xi jun

(Lab. for Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** In this paper, the history, present situation and future of intelligent mobile robots technology are summarized. We analyze the technologies of robot navigation and localization, multisensor fusion etc. In addition, point out the advantages and disadvantages of these technologies. we also further describe the mobile robot technologies concerning biomimetic robot, multi-robot system and robocup.

**Keywords:** navigation and localization; path planning; multisensor fusion; multi-robot system and robocup

### 1 引言 (Introduction)

移动机器人的研究始于 60 年代末期. 斯坦福研究院(SRI)的 Nils Nilsson 和 Charles Rosen 等人, 在 1966 年至 1972 年中研造出了取名 Shakey<sup>[1]</sup>的自主移动机器人. 目的是研究应用人工智能技术, 在复杂环境下机器人系统的自主推理、规划和控制. 与此同时, 最早的操作式步行机器人也研制成功, 从而开始了机器人步行机构方面的研究, 以解决机器人在不平整地域内的运动问题, 设计并研制出了多足步行机器人. 其中最著名是名为 General Electric Quadruped<sup>[2]</sup>的步行机器人. 70 年代末, 随着计算机的应用和传感技术的发展, 移动机器人研究又出现了新的高潮. 特别是在 80 年代中期, 设计和制造机器人的浪潮席卷全世界. 一大批世界著名的公司开始研制移动机器人平台, 这些移动机器人主要作为大学实验室及研究机构的移动机器人实验平台, 从而促进了移动机器人学多种研究方向的出现. 90 年

代以来, 以研制高水平的环境信息传感器和信息处理技术, 高适应性的移动机器人控制技术, 真实环境下的规划技术为标志, 开展了移动机器人更高层次的研究.

### 2 移动机器人分类 (The categories of mobile robot)

移动机器人从工作环境来分, 可分为室内移动机器人和室外移动机器人; 按移动方式来分: 轮式移动机器人、步行移动机器人、蛇形机器人、履带式移动机器人、爬行机器人等; 按控制体系结构来分: 功能式(水平式)结构机器人、行为式(垂直式)结构机器人和混合式机器人; 按功能和用途来分: 医疗机器人、军用机器人、助残机器人、清洁机器人等. 按作业空间来分: 陆地移动机器人、水下机器人、无人飞机和空间机器人. 本文仅论述陆地移动机器人.

### 3 移动机器人技术的主要研究方向 (The main research direction of mobile robot technology)

#### 3.1 导航和定位

导航和定位是移动机器人研究的两个重要问题. 移动机器人的导航方式可分为: 基于环境信息的地图模型匹配导航; 基于各种导航信号的陆标导航、视觉导航和味觉导航等.

环境地图模型匹配导航是机器人通过自身的各种传感器, 探测周围环境, 利用感知到的局部环境信息进行局部地图构造, 并与其内部事先存储的完整地图进行匹配. 如两模型相互匹配, 机器人可确定自身的位置, 并根据预先规划的一条全局路线, 采用路径跟踪和避障技术, 实现导航. 它涉及环境地图模型建造和模型匹配两大问题<sup>[3,4]</sup>.

陆标导航是事先将环境中的一些特殊景物作为陆标, 机器人在知道这些陆标在环境中的坐标、形状等特征的前提下, 通过对陆标的探测来确定自身的位置. 同时将全局路线分解成为陆标与陆标间的片段, 不断地对陆标探测来完成导航. 根据陆标的不同, 可分为人工陆标导航和自然陆标导航. 人工陆标导航<sup>[5]</sup>是机器人通过对人为放置的特殊标志的识别实现导航, 虽然比较容易实现, 但它人为地改变了机器人工作的环境. 自然陆标导航不改变工作环境, 是机器人通过对工作环境中的自然特征的识别完成导航, 但陆标探测的稳定性和鲁棒性是研究的主要问题<sup>[6]</sup>.

视觉导航主要完成障碍物和陆标的探测及识别. T rahani as<sup>[7]</sup>利用视觉探测陆标来完成机器人导航. 其中陆标不是事先定义的人工陆标, 而是在学习阶段自动抽取的自然陆标. 视觉导航中边缘锐化、特征提取等图像处理方法计算量大, 实时性差始终是一个瓶颈问题. 解决该问题的关键在于设计一种快速的图像处理方法. Stanley<sup>[8]</sup>提出了基于神经网络的机器人视觉导航技术. 该技术中估算逆雅可比矩阵是基于视觉导航的一个关键问题. 它将图像特征的变化与机器人的位置变化对应起来, 通过神经网络训练来近似特征雅可比矩阵的逆阵. 该技术, 通过提取几何特征、平均压缩、向量量化和主成分提取来简化图像处理, 实现实时视觉导航.

味觉导航<sup>[9,10]</sup>是通过机器人配备的化学传感器感知气味的浓度, 根据气味的浓度和气流的方向来控制机器人的运动. 由于气味传感器具有灵敏度高、

响应速度快以及鲁棒性好等优点, 近年来许多研究人员在气味导航技术上做了许多研究工作. 但该技术能够真正应用到实际环境中的却很少, 仍处于试验研究阶段. Figaro Engineering Inc. 公司研制的氧化锡气味传感器, 被广泛用于气味导航试验. 石英晶体微平衡气味传感器、导电聚合物气味传感器和一种模仿哺乳动物鼻子功能的电子鼻等用于移动机器人味觉导航的传感器都处于试验阶段. 目前的味觉导航试验多采用将机器人起始点和目标点之间用特殊的化学药品, 如酒精和樟脑丸等, 引导出一条无碰气味路径, 机器人根据不同的道路跟踪算法, 用气味传感器感知气味的浓淡和气味源的方向进行机器人导航试验. 味觉导航的研究具有很好的研究价值, 该种移动机器人可用来寻找化学药品泄露源.

#### 3.1.1 定位

作为移动机器人导航最基本环节, 定位是确定机器人在二维工作环境中相对于全局坐标的位姿. 定位方法根据机器人工作环境复杂性, 配备传感器的种类和数量等不同有多种方法. 主要方法有: 惯性定位、陆标定位和声音定位等. 惯性定位是在移动机器人的车轮上装有光电编码器, 通过对车轮转动的记录来粗略地确定位置和姿态. 该方法虽然简单, 但是由于车轮与地面存在打滑现象, 产生的累积误差随路径的增加而增大, 定位误差会逐渐累积, 引起更大的误差. Yam auch i<sup>[11]</sup>使用推测航行法和证据栅格来实现动态环境中的机器人位置. 该方法把在不同时段建立的证据栅格匹配起来, 使用一种爬山算法搜索可能的平移与转动空间, 来消除推测航行法的误差累积; 陆标定位<sup>[5]</sup>在移动机器人工作的环境里, 人为地设置一些坐标已知的陆标, 如超声波发射器、激光反射板等, 通过对陆标的探测来确定自身的位姿.

三角测量法是陆标定位常用的方法, 机器人在同一点探测到三个陆标, 并通过三角几何运算, 可确定机器人在工作环境中的坐标. 陆标定位是普遍采用的方法, 可获得较高的定位精度且计算量小, 可用于实际的生产中. 但该方法需要对环境作一些改造, 不太符合真正意义的自主导航; 声音定位<sup>[12]</sup>用于物体超出视野之外或光线很暗时, 视觉导航和定位失效的情况之下. 基于声音的无方向性和时间分辨率高等优点, 采用最大似然法、时空梯度法和 MUSIC 方法等可实现机器人的精确定位.

#### 3.1.2 路径规划

不论采用何种导航方式, 智能移动机器人主要

完成路径规划、定位和避障等任务。路径规划是自主式移动机器人导航的基本环节之一。它是按照某一性能指标搜索一条从起始状态到目标状态的最优或近似最优的无碰路径。根据机器人对环境信息知道的程度不同,可分为两种类型:环境信息完全知道的全局路径规划和环境信息完全未知或部分未知,通过传感器在线地对机器人的工作环境进行探测,以获取障碍物的位置、形状和尺寸等信息的局部路径规划。

全局路径规划包括环境建模和路径搜索策略两个子问题。其中环境建模的主要方法有:可视图法(V-Graph)、自由空间法(Free Space Approach)和栅格法(Grids)等。可视图法<sup>[13]</sup>视机器人为一点,将机器人、目标点和多边形障碍物的各顶点进行组合连接,要求机器人和障碍物各顶点之间、目标点和障碍物各顶点之间以及各障碍物顶点与顶点之间的连线,均不能穿越障碍物,即直线是可视的。搜索最优路径的问题就转化为从起始点到目标点经过这些可视直线的最短距离问题。运用优化算法,可删除一些不必要的连线以简化可视图,缩短搜索时间。该法能够求得最短路径,但假设机器人的尺寸大小忽略不计,使得机器人通过障碍物顶点时离障碍物太近甚至接触并且搜索时间长,对于  $N$  条连线的搜索时间为  $O(N^2)$ <sup>[14]</sup>。Voronoi Diagrams 法和 Tangent Graph 法<sup>[15]</sup>对可视图法进行了改进;自由空间法应用于机器人路径规划,采用预先定义的如广义锥形和凸多边形<sup>[16]</sup>等基本形状构造自由空间,并将自由空间表示为连通图,通过搜索连通图来进行路径规划。该法比较灵活,起始点和目标点的改变不会造成连通图的重构,但算法的复杂程度与障碍物的多少成正比,且不是任何情况下都能获得最短路径;栅格法<sup>[17]</sup>将机器人工作环境分解成一系列具有二值信息的网格单元,多采用四叉树或八叉树表示工作环境,并通过优化算法完成路径搜索。该法以栅格为单位记录环境信息,环境被量化成具有一定分辨率的栅格,栅格的大小直接影响着环境信息存储量的大小和规划时间的长短。栅格划分大了,环境信息存储量小,规划时间短,但分辨率下降,在密集环境下发现路径的能力减弱;栅格划分小了,环境分辨率高,在密集环境下发现路径的能力强,但环境信息存储量大,规划时间长,可以采用改进的栅格法<sup>[18]</sup>弥补栅格法的不足。路径搜索策略主要有:A\* 算法<sup>[19]</sup>、D\* 最优算法<sup>[20]</sup>等。

局部路径规划的主要方法有:人工势场法(Arti-

ficial Potential Field)、遗传算法(Genetic Algorithm)和模糊逻辑算法(Fuzzy Logic Algorithm)等。人工势场法<sup>[21]</sup>是由 Khatib 提出的一种虚拟力法,其基本思想是将机器人在环境中的运动视为一种虚拟的人工受力场中的运动。障碍物对机器人产生斥力,目标点产生引力,引力和斥力的合力作为机器人的加速力,来控制机器人的运动方向和计算机器人的位置。该法结构简单,便于低层的实时控制,在实时避障和平滑的轨迹控制方面,得到了广泛的应用,但对存在局部最优解的问题,容易产生死锁现象(Dead Lock)<sup>[22]</sup>,因而可能使机器人在到达目标点之前就停留在局部最优点;J. Holland<sup>[23]</sup>在 60 年代初提出了遗传算法,以自然遗传机制和自然选择等生物进化理论为基础,构造了一类随机化搜索算法。它利用选择、交叉和变异来培养控制机构的计算程序,在某种程度上对生物进化过程做数学方式的模拟。它不要求适应度函数是可导或连续的,而只要求适应度函数为正,同时作为并行算法,它的隐并行性适用于全局搜索。多数优化算法都是单点搜索算法,很容易陷入局部最优,而遗传算法却是一种多点搜索算法,因而更有可能搜索到全局最优解。由于遗传算法的整体搜索策略和优化计算不依赖于梯度信息,所以解决了一些其它优化算法无法解决的问题。但遗传算法运算速度不快,进化众多的规划要占据较大的存储空间和运算时间;基于实时传感信息的模糊逻辑算法<sup>[24]</sup>参考人的驾驶经验,通过查表得到规划信息,实现局部路径规划。该方法克服了势场法易产生的局部极小问题,适用于时变未知环境下的路径规划,实时性较好。

### 3.2 多传感器信息融合方面的研究

移动机器人的多传感器信息融合方面的研究始于 80 年代。多传感器融合<sup>[25]</sup>的常用方法有:加权平均法、贝叶斯估计、卡尔曼滤波、统计决策理论、D-S 证据推理、神经网络和模糊推理法以及带置信因子的产生式规则。其中加权平均法是最简单也最直观的方法,一般用于对动态低水平的数据进行处理,但结果不是统计上的最优估计;贝叶斯估计是融合静态环境中多传感器低层数据的常用方法,适用于具有高斯白噪声的不确定性传感信息融合;对于系统噪声和观测噪声为高斯白噪声的线性系统模型用卡尔曼滤波(KF)来融合动态低层次冗余传感信息,对于非线性系统模型采用扩展卡尔曼滤波(EKF)或者分散卡尔曼滤波(DKF);统计决策理论用于融合多

个传感器的同一种数据,常用于图像观测数据;D-S证据推理是贝叶斯估计法的扩展,它将局部成立的前提与全局成立的前提分离开来,以处理前提条件不完整的信息融合;基于神经网络法根据系统要求和融合形式,选择网络拓扑结构,通过网络学习确定网络连接权值,对各传感器的输入信息进行融合.系统具有很强的容错性和鲁棒性;模糊推理法首先对多传感器输出进行模糊化,将所测得的距离等信息分级,表示成相应的模糊子集,并确定模糊子集的隶属度函数,通过融合算法对隶属度函数综合处理,再将模糊融合结果清晰化,求出融合值;带置信因子的产生式规则主要用于符号水平层表达传感器信息,结合专家系统对多传感信息进行融合.

### 3.3 多机器人系统与机器人足球

多机器人系统的研究始于20世纪70年代.随着机器人应用领域的不断拓展、机器人工作环境复杂度、任务的加重,对机器人的要求不再局限于单个机器人,多机器人的研究已经成为机器人学研究的一个热点.多机器人系统的研究分为多机器人合作(Multi-robot Coordination)和多机器人协调(Multi-robot Cooperation)两大类,主要研究给定一个多机器人系统任务后,如何组织多个机器人去完成任务,如何分解和分配任务以及如何保持机器人之间的运动协调一致.近年来,国际上很多研究机构在该方面的研究取得了一定的成果.美国Oak Ridge国家试验室的Cooperative Robotics实验系统<sup>[26]</sup>研究的协作机器人是集成了感知、推理、动作的智能系统,着重研究在环境未知且在任务执行过程中环境动态变化的情况下,机器人如何协作完成任务.美国USC大学Socially Mobile和The Nerd Herd<sup>[27]</sup>实验系统在多机器人学习、群行为、协调与协作等方面开展工作.日本Nagoya大学的CEBOT系统<sup>[28]</sup>的研究,涉及到系统的体系结构、通讯、信息交互等许多方面.中国科学院沈阳自动化所的MRCAS系统<sup>[29]</sup>在多机器人协作理论研究的基础上开展多机器人协作的实验研究.

机器人世界杯足球赛(RoboCup)<sup>[30]</sup>是以Multi-agent系统(MAS)与分布式人工智能(DAI)为主要研究背景的,其主要目的就是通过提供一个标准的、易于评价的比赛平台,促进DAI与MAS的研究与发展.涉及的研究领域包括:智能机器人系统、智能

体结构设计、传感器融合技术、多智能体系统、实时规划和推理和基于网络的三维图形交互等. RoboCup比赛自1997年在日本Nagoya举办的第一届以来已经举办了五届. RoboCup的比赛水平直接反映了机器人与智能控制技术的研究水平.同时,其产生的国际影响又大大促进了机器人与智能控制技术的研究与发展.

## 4 仿生学与机构的研究(The study of bionics and mechanics)

近年来,全球许多机器人研究机构都开展了仿生学与机构的研究工作.在生态学基础上,研究昆虫、爬行动物等自然界生物的各种生存策略与形态,如:蚂蚁的群体协作、觅食、路线跟踪与搜索和信息传递等策略,蜜蜂的定位和采粉策略,蛇的爬行动态等,将各种生物的特长再现于机器人上. NASA的Snakebot蛇形机器人,能够穿梭在受灾现场的瓦砾狭缝之中,寻找幸存者.该蛇形机器人由于重心低且完全模仿蛇的动作因而行动灵敏、鲁棒性好,可以用于受灾现场生还者的寻找和军事侦察; SONY公司1999年推出的宠物机器人Aibo具有喜、怒、哀、厌、惊和奇6种情感状态.它能爬行、坐立、伸展和打滚,而且摔倒后可立即爬起来.在Aibo的头部内置有用于视觉的180,000像素的彩色CCD摄像机、语音输入和输出的微型麦克风和扬声器、红外避障传感器和触觉传感器. Aibo的身上除了装有64位RISC处理器、16MB内存用于处理传感器所输入的数据和控制自身个关节部位的动作外,还装有保持平衡的重力加速度传感器和角速度传感器、以及感知自身温度的温度计;本田公司1997年研制的Honda P3类人机器人代表着当今世界双足步行机器人的最高水平.它体重130Kg、高1,600mm、宽600mm,工作时间25 minute,最大步行速度为2.0Km/h(人的步行速度约为3.0Km/h). P3的CPU采用了两个主频为110MHz的MicrospecII处理器,身上装有助于视觉导航的视觉传感器、感知自身姿态的陀螺仪、保持平衡的重力加速度传感器和两个脚踝处的6维力传感器、实现语音功能的麦克风和扬声器,以及用于测量行走时腿运动的关节角度传感器. P3的驱动装置采用138V【Ah镍锌电池供电和带有谐波减速器的直流伺服电机.通讯系统采用了无线以太网(Wireless Ethernet system)通讯. P3能够自主地动态行走在颠

簸起伏的路面上, 也能够倾斜的路面上动态行走, 甚至能够上、下楼梯, 单脚站立。

## 5 移动机器人传感技术常用的传感器(The usual sensors applied in transducer technology of mobile robot)

移动机器人传感技术主要是对机器人自身内部的位置和方向信息以及外部环境信息的检测和处理。采用的传感器分为内部传感器和外部传感器。其中内部传感器有: 编码器、线加速度计、陀螺仪、磁罗盘、激光全局定位传感器、GPS(Global Position System)、激光雷达。其中编码器粗略地确定机器人位置; 线加速度计获取线加速度信息, 进而得到当前机器人的线速度和位置信息; 陀螺仪测量移动机器人的角度、角速度、角加速度以得到机器人的姿态角、运动方向和转动时的运动方向的改变等绝对航向信息弥补应用编码器测位置的航位推测法的不足; 激光全局定位传感器运用三角测量法得到机器人的位置坐标信息, 与 GPS 一样多用于室外移动机器人定位。外部传感器有: 视觉传感器、超声波传感器、红外传感器、接触和接近传感器。视觉传感器采用 CCD 像机进行机器人的视觉导航与定位、目标识别和地图构造等; 超声波传感器测量机器人工作环境中障碍物的距离信息和地图构造等; 红外传感器多采用红外接近开关来探测机器人工作环境中的障碍物以避免碰撞; 接触和接近传感器多用于避碰规划。

## 6 移动机器人主要研究和发展趋势(The main research and development trends of mobile robot)

目前影响智能移动机器人技术研究的因素主要有: 导航与定位、通讯、传感技术和运动控制策略等。步入 21 世纪, 随着电子技术的飞速发展, 机器人用传感器的不断研制、计算机运算速度显著提高和机器人应用领域的进一步扩大, 移动机器人技术将逐渐地得到完善和发展。移动机器人技术的研究与发展的趋势<sup>[31-33]</sup>包括:

(1) 导航与定位 无论是单个移动机器人还是多个移动机器人系统, 导航与定位始终是一项难题。在完全未知或部分未知环境下, 基于自然路标导航与定位技术以及视觉导航中路标的识别和图像处理的快速算法的研究, 并通过专用数字信号处理器(DSP)的开发与研制, 可以为导航与定位提供突破性进展。

(2) 仿生学和类人机器人机构与能源方面的研

究 日本本田公司的 Honda P3 步行机器人虽然代表着当今世界类机器人的最高水平, 但仍存在供电时间短、行走缓慢和语音功能不完善等方面的问题。P3 机器人目前采用的镍锌电池只能供给 25 分钟的电量, 电池的体积、重量与其蓄电容量相比, 庞大而笨重, 远不能满足未来服务步行机器人的工作时间要求。需研制适用于移动机器人携带的蓄电容量大且体积小、重量轻的蓄电池, 以解决可携带能源问题; 类机器人的语音功能远未达到未来同人类共存与合作所应具备的语音功能, 需要在语音信号特征提取和模式匹配、抗噪声以及语音识别器的词汇量扩充等方面, 进行探讨; 类机器人的行走速度同人类的行走乃至奔跑速度还有较大差距。需要研制体积小、重量轻驱动力大的驱动系统和完善行走机构来近似人类的肌肉和骨骼; 同时, 研究自然界各种生物的觅食、定位及路径跟踪等生态策略, 将人类所不及的生物特长赋予机器人, 研制如机器蛇、机器狗和机器鱼等各种仿生机器人。

(3) 多传感器信息的集成融合 多传感器信息融合的算法很多, 但多数算法都是基于线性正态分布的平稳随机过程前提下, 解决非线性和非平稳非正态分布的现实信息还有待深入地研究。

(4) 网络机器人 随着计算机网络的扩展延伸, 网络技术的发展完善, 通过计算机网络遥控机器人, 为人机交互技术、监控技术、远程操作技术和图像与控制命令的网络传输及并发多进程数据通讯等通讯技术提出了更高的挑战。

(5) 多机器人系统 目前多机器人系统的研究尚处于理论研究阶段, 对于多机器人系统体系结构与协作机制、信息交互以及冲突消除等方面将是多机器人系统的进一步研究方向。

(6) 特种机器人 移动机器人在各个领域中的应用刺激了特种机器人的研究与开发。战场上, 为保护士兵的生命, 刺激了无人战车、扫雷机器人和侦察机器人等军用机器人的不断研究; 人民生活水平的提高促进了娱乐机器人、外科手术机器人和助残机器人等民用服务机器人的开发。

## 7 结论(Conclusion)

综上所述, 移动机器人技术已经取得了可喜的进展, 研究成果令人鼓舞, 但还远未达到实用要求。随着传感技术、智能技术和计算技术等不断提高, 智能移动机器人一定能够在生产和生活中扮演人的角色。

## 参考文献 (References)

- [1] Nilsson N. A mobile automation: An application of artificial intelligence techniques. In Proc IJCAI, 1969
- [2] R S Mosher. Test and evaluation of a versatile walking truck. In Proc of the off-road Mobility Res Symp Int Soc Terrain Vehicle Systems, Washington DC. 1968: 359- 379
- [3] Chong K S, Kleeman L. Sonar Based Map Building for a Mobile Robot. Proc of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Auto, 1997, 2: 1700- 1705
- [4] E Bourque, G Dudek. Automated image-based mapping. In workshop on perception for creating virtual environments. In Proc IEEE Int Conf On Robotics and Automation, Leuven Belgium, 1998
- [5] Thrun S. Finding Landmarks for Mobile Robot Navigation. Proc of IEEE Inter Conf Robotics and Auto, 1998, 2: 958- 963
- [6] O Wijk, H I Christensen. Localization and navigation of a mobile robot using natural point landmarks extracted from data. Robotics and Autonomous Systems. 2000, 3: 131- 42
- [7] Trahanias P. Visual Recognition of Workspace Landmarks for Topological Navigation. Autonomous Robotics, 1999, 7(2): 143 - 158
- [8] Stanley K, Wu Q M J. Neural Network-Based Vision Guided Robotics. Proceedings of the 1999 IEEE Inter Conf on Robotics and Automation. 1999, 1: 281- 286
- [9] Marques L, de Almeida, A T. Application of odor sensors in mobile robotics. In Autonomous Robotic Systems, Lecture Notes in Control and Information Sciences 236 1998: 264- 275
- [10] R Andrew Russell. Survey of Robotic Applications for Odor Sensing Technology. The International Journal of Robotics Research. 2001, 20(2): 144- 162
- [11] Yamachi B. Mobile robot localization in dynamic environments using dead reckoning and evidence grids. Proc of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation. 1996, 2: 1401- 1406
- [12] Jie Huang, Tadawate Supaongprapa. A model-based sound localization system and its application to robot navigation. Robotics and Autonomous Systems. 1999, 27: 199- 209
- [13] Pere. Automatic Planning of Manipulator Movements. IEEE Trans on Sys Man and Cyb. 1981, 11(11): 681- 698
- [14] Gregory Dudek, Michael Jenkin. Computational Principles of Mobile Robotics. Cambridge Univer Press. 2000: 132- 145
- [15] J C Latombe. Robot Motion Planning. Kluwer, Norwell. MA. 1991
- [16] R A Brooks. Solving the Find-path problem by Good Representation of Free Space. IEEE Trans on Sys Man and Cybern. 1983, 13(3): 190- 197
- [17] M B Metea. Planning for Intelligence Autonomous Land Vehicles Using Hierarchical Terrain Representation. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. 1987: 1947- 1952
- [18] 袁曾任, 高明. 在动态环境中移动机器人导航和避碰的一种新方法. 机器人, 2000, 22(2): 81- 88
- [19] C Alexopoulos, P M Griffin. Path Planning for a Mobile Robot. IEEE Trans on Sys Man and Cybern. 1992, 22(2): 318- 322
- [20] Yahja A, Singh S Stentz. An efficient on-line path planner for outdoor mobile robots. Robotics and Autonomous Systems. 2000, 32(2-3): 129- 143
- [21] O Khatib. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. Int J Robotics Research, 1986, 5(1): 90- 98
- [22] Yong K Hwang, Narendra Ahuja. A Potential Field Approach to Path Planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1992, 8(1): 23- 32
- [23] Holland J H. Genetic Algorithms and the Optimal Allocation of Trails SIAM Journal of Computing, 1973, 2(2): 88- 105
- [24] Nelson H C, Yung Cang Ye. An Intelligent Mobile Vehicle Navigator Based on Fuzzy Logic and Reinforcement Learning. IEEE Trans on Sys Man and Cybern. Part B: Cybernetics, 1999, 29(2): 314- 321
- [25] 王军, 苏剑波, 席裕庚. 多传感器集成与融合概述. 机器人, 2001, 23(2): 183- 192
- [26] Lynne E Parker. Cooperative Robotics for Multi-Target Observation, Intelligent Automation and Soft Computing, special issue on Robotics Research at Oak Ridge National Laboratory, 1999, 5(1): 5- 19
- [27] M J Maravic', Learning to Behave Socially, in D Cliff, P Husbands, J-A Meyer, S Wilson, eds. From Animals to Animats: International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, 1994: 453- 462
- [28] Ueyama T, Fukuda T. Self-organization of Cellular Robots Using Random Walk with Simple Rules. Proceedings of IEEE ICRA, 1993, 3: 595- 600
- [29] 王越超. 多机器人协作系统研究. 哈尔滨工业大学博士论文, 1999
- [30] Asada M, Kitano H. The Robocup Challenge. Robotics and Autonomous Systems 1999, 29(1): 3- 12
- [31] 蒋新松. 未来机器人技术发展方向探讨. 机器人, 1996, 18(5): 285- 291
- [32] 蔡鹤皋. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点. 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 58- 60
- [33] 谭民, 范永, 徐国华. 机器人群体协作与控制的研究. 机器人, 2001, 23(2): 178- 182

## 作者简介:

李 磊 (1975-), 男, 博士研究生. 研究领域: 移动机器人视觉导航与路径规划, 智能控制, 模式识别.

叶 涛 (1976-), 男, 博士研究生. 研究领域: 移动机器人语音导航与路径规划, 多传感器融合.

谭 民 (1962-), 男, 研究员、博士生导师. 研究领域: 故障诊断与可靠性, 复杂系统控制理论及应用, 制造系统与先进机器人控制等.