

文章编号: 1002-0446(2003)05-0470-05

## 移动机器人导航技术现状与展望\*

王志文, 郭戈

(甘肃工业大学电气与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 移动机器人导航涉及到路径规划, 传感器的选择及传感器信息的融合等技术. 本文综述了自主式移动机器人的导航技术, 对其中的定位、路径规划及多传感器信息融合等技术进行了较详细的分析. 同时对移动机器人导航技术的发展趋势作了进一步的阐述.

**关键词:** 移动机器人; 导航; 定位; 路径规划; 多传感器融合; 人工神经网络; 模糊逻辑

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

### PRESENT SITUATION AND FUTURE DEVELOPMENT OF MOBILE ROBOT NAVIGATION TECHNOLOGY

WANG Zhi-wen, GUO Ge

(College of Electrical and Information Engineering, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Navigation of mobile robot involves path planning, sensor selection and multisensor fusion, etc. In this paper, we summarize the navigation technology of autonomous mobile robot and analyze the technology of localization, path planning and multisensor fusion. Meanwhile, we describe the trend of mobile robot navigation technology.

**Keywords:** mobile robot; navigation; localization; path planning; multisensor fusion; artificial neural network; fuzzy logic

#### 1 引言 (Introduction)

移动机器人的研究始于 20 世纪 60 年代末期, 目的是研究人工智能技术及在复杂环境下机器人系统的自主推理和规划能力. 70 年代末, 随着计算机技术和传感技术的发展, 世界上一批著名公司开始研究移动机器人平台, 这些移动机器人平台主要作为大学实验室及研究机构的移动机器人实验平台. 近年来, 自主式移动机器人 (Autonomous Mobile Robot) 技术在工业、农业、医学及社会服务业等领域显示了越来越广泛的应用前景, 因而成为国际机器人学术界研究的热点问题<sup>[1, 2, 18]</sup>.

在自主式移动机器人相关技术的研究中, 导航技术是其研究核心. 导航是指移动机器人通过传感器感知环境和自身状态, 实现在有障碍物的环境中面向目标的自主运动. 导航主要解决三方面的问题: (1) 通过一定的检测手段获取移动机器人在空间中的位置、方向以及所处环境的信息; (2) 用一定的算法对所获信息进行处理并建立环境模型; (3) 寻找一

条最优或近似最优的无碰路径, 实现移动机器人安全移动的路径规划. 目前, 对移动机器人导航技术的研究已取得了大量的成果, 但还有很多关键理论和技术问题有待解决和完善. 本文将就移动机器人的导航技术展开讨论.

#### 2 移动机器人的导航方式 (The navigation manner of mobile robot)

常见的导航方式有电磁导航<sup>[1]</sup>、光反射导航<sup>[1]</sup>、视觉导航<sup>[1, 2, 21]</sup>、味觉导航<sup>[2, 21]</sup>、声音导航<sup>[2, 21]</sup>等.

电磁导航也称为地下埋线导航<sup>[1, 2]</sup>, 是 20 世纪 50 年代美国开发的, 到 20 世纪 70 年代这种导航方式迅速发展并广泛应用于柔性生产. 其原理是在路径上连续埋设多条引导电缆, 分别流过不同频率的电流, 通过感应线圈对电流的检测来感知路径信息. 中国科学院沈阳自动化研究所已生产出基于电磁导航的多代移动机器人产品<sup>[2]</sup>. 该技术简单实用, 但其成本高, 改造和维护困难. 光反射导航的原理是在路径上连续铺设光反射条, 是一种方式简单、价格便宜

\* 基金项目: 国家科技攻关项目 (2002BA901 A28); 甘肃省省长基金项目 (GS015- A52-012).

收稿日期: 2003-01-10

的导航系统.上述两种导航技术已相当成熟,目前国内制造行业使用的移动机器人大多是基于这两种导航方式.

视觉导航方式具有信号探测范围宽、获取信息完整等优点,是未来移动机器人导航的一个主要发展方向.在视觉导航系统中,目前国内外应用最多的是采用在移动机器人上安装车载摄像机的基于局部视觉的导航方式.采用这种导航方式,所有的计算设备和传感器都装载在机器人车体上,图像识别、路径规划等高层决策都由车载计算机完成,因而延时问题较为明显.现在也有很多机器人系统采用 CCD (charge coupled device) 图像传感器<sup>[1,2]</sup>. CCD 传感器在一个硅衬底上配置光敏元件和电荷转移器件,通过电荷的依次转移,将多个像素的信息分时、顺序地取出来,分为一维和二维两种传感器.其中二维的图像传感器需要进行水平、垂直方向扫描,对扫描所得的模拟电压进行采样、量化,并将数字化了的数据存储在计算机内的二维阵列处理器中.视觉导航中的图像处理计算量大,实时性差始终是一个瓶颈问题.为了提高导航系统的实时性和导航精度,仍需研究更加合理的图像处理方法.

当物体不在视野之内或光线很暗时,视觉导航方式将失效,此时,声音是最有用的信息.与视觉相比,声音的空间分辨率比较低,但声音具有无方向性,时间分辨率高,能在黑暗中工作等优点.因此研究人员提出了基于声音的导航方式,并采用 MUSIC 法<sup>[2]</sup>、时间-空间梯度法<sup>[2]</sup>、最大似然法<sup>[2]</sup>来实现机器人的精确定位.

味觉导航是指机器人通过化学传感器感知气味,根据气味浓度和气流方向来控制机器人的运动.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.目前的味觉导航实验多采用在机器人的起始点与目标点之间用特殊的化学药品,引出一条无碰气味路径.这种导航方式有很好的实用价值,如用于搜寻空气污染源和化学药品泄露源等.

### 3 移动机器人导航中的相关技术 (Technology relative to mobile robot navigation)

#### 3.1 定位

定位<sup>[1,2,5-7,12]</sup>是确定移动机器人在二维工作环境中相对于全局坐标的位置及其本身的姿态,是移动机器人导航的最基本环节.定位技术可分为绝对定位技术和相对定位技术.

相对定位技术主要有测距法<sup>[2,6]</sup>和惯性导航

法<sup>[2,6]</sup>.测距法以位移方程  $S = \sum_{i=0}^n \Delta S_i$  为基础,其中  $S$  为第  $n$  个采样周期时车轮移动的总路程,  $\Delta S_i$  为第  $i$  个采样周期内车轮移动的路程.测距法常采用的传感器有光电编码器<sup>[6,13]</sup>、里程计<sup>[6,13]</sup>和航向陀螺仪<sup>[6,13]</sup>.其优点是具有良好的短期精度、低廉的价格以及较高的采样速率.惯性导航法采用陀螺仪和加速度计实现定位,陀螺仪测量回转速度,加速度计测量加速度.根据测量值的一次积分和二次积分可分别求出角度和位置参量.陀螺仪通过对所测的角速度值进行积分,计算出相对于起始方向的偏转角度,即  $\delta = \int_{t_0}^t \omega(t) dt$ .其中:  $\delta$  为  $t$  时刻相对起始方向的偏转角度,  $\omega$  为瞬时角速度,  $t_0$  为起始时间.相对定位技术的基本思路都是基于测量值的累积,因而无法避免时间漂移问题,随着路径的增长,任何小的误差经过累积都会无限增加.因此,相对定位不适于长距离和长时间的准确定位,通常将它们与绝对位置测量技术相结合,以获得更可靠的位置估计.

绝对定位技术中比较成熟的有全球定位系统<sup>[6,11]</sup>、路标定位<sup>[2,6,7]</sup>和地图匹配定位<sup>[2,5-7,12]</sup>.全球定位系统 (Global Positioning System) 简称 GPS,它是一种以空间卫星为基础的高精度导航与定位系统. GPS 定位系统用于移动机器人定位时存在近距离定位精度低等问题.路标定位是一种常见的定位技术.路标是具有明显特征的能被机器人传感器识别的特殊物体.根据路标的不同,分为基于自然路标定位和基于人工路标定位.其中,人工路标定位技术应用得最为成熟.人工路标定位是在移动机器人的工作环境里,人为地设置一些坐标已知的路标,如超声波发射器、激光反射板等,机器人通过对路标的探测来确定自身的位置.基于已知地图的定位系统称为地图匹配定位技术,移动机器人通过自身的传感器探测周围环境,并利用感知到的局部信息进行局部地图构造,然后将这个局部地图与预先存储的完整地图进行比较,如两地图相互匹配,就能计算出机器人在工作环境中的位置与方向.地图匹配定位的两个关键技术是地图模型的建立和匹配算法.

#### 3.2 路径规划

路径规划<sup>[1,2,9]</sup>是研究自主移动机器人技术的一个活跃课题,所谓路径规划是指移动机器人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次最优的无碰路径.根据掌握环境信息的完整程度可分为环境信息完全已知的离线全局路径规划<sup>[1,2]</sup>和环境信息完全未知或部分未知的在线局部

路径规划<sup>[1,2]</sup>,分别称为静态路径规划<sup>[1,2]</sup>和动态路径规划<sup>[1,2]</sup>.确定环境下的全局路径规划研究已取得了丰硕的成果.近年来,学术界的研究重点集中在环境部分已知和完全未知的局部路径规划领域.

全局路径规划的主要方法有:可视图法(V-Graph)<sup>[1,2]</sup>、栅格法(Grids)<sup>[2,3]</sup>等.所谓图<sup>[1]</sup>就是用弧连接节点的数据结构,节点意味着机器人的位置,弧意味着两个位置间的移动,在图上给出距离、工作量或时间.可视图法将机器人、目标点和多边形障碍物的各顶点视为节点,把机器人、目标点和多边形障碍物的各顶点进行组合连接,连接的直线视为弧,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.从而最优路径搜索问题就转化为在这些直线中搜索从起始点到目标点的最短距离问题.可视图法能求得最短路径,但缺乏灵活性,若障碍物过多,搜索时间会很长.采用优化算法删除一些不必要的连线,可以简化可视图,缩短搜索时间.可视图法适用于多边形障碍物,对于圆形障碍物该法失效.切线图(Tangent Graph)法<sup>[1,2]</sup>和

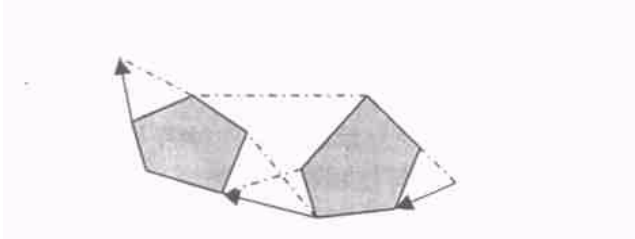


图 1 切线  
Fig.1 Tangent graph

局部路径规划的主要方法有:人工势场法(Artificial Potential Field)<sup>[2,10]</sup>、模糊逻辑算法(Fuzzy Logic Algorithm)<sup>[2,4,8,18]</sup>、遗传算法(Genetic Algorithm)<sup>[2,18,19,20]</sup>等.人工势场法是由 Khatib 提出的一种虚拟力法,其基本思想是建立一种虚拟力,将机器人在未知环境中的运动视为在人工虚拟力场中的运动,即目标对被规划对象存在吸引力,而障碍物对其有排斥力,引力与斥力的合力作为机器人运动的加速力,从而计算机器人的位置和控制机器人的运动方向.势场法结构简单,便于低层的实时控制.其缺陷主要有四个方面:(一)存在陷阱区域;(二)在相近的障碍物群中不能识别路径;(三)在障碍物前震荡;(四)在狭窄通道中摆动.因而可能会使机器人在到达目标前就停车.模糊逻辑算法是通过驾驶员的工作过程观察研究得出的.驾驶员的避碰动作并

Voronoi 图法<sup>[1,2]</sup>对可视图法进行了改造.切线图(如图 1)用障碍物的切线表示弧,因此是从起始点到目标点的最短路径的图,即移动机器人必须几乎接近障碍物行走.其缺点是如果控制过程中产生位置误差,机器人碰撞障碍物的可能性会很高.图 2 用尽可能远离障碍物和墙壁的路径表示弧.由此,从起始节点到目标节点的路径将会增长,但采用这种控制方式时,即使产生位置误差,移动机器人也不会碰到障碍物.栅格法<sup>[3]</sup>将机器人的工作环境分解成一系列具有二值信息的网格单元,每个矩形栅格有一个累积值,表示在此方位中存在障碍物的可信度,高的累积值表示存在障碍物的可能性高.传感器不断快速采样环境,存在障碍物的栅格将会不断被检测到,从而导致高的累积值.栅格大小的选择直接影响着控制算法的性能,栅格选得小,环境分辨率小,但抗干扰能力弱,环境信息存储量大,决策速度慢;栅格选得大,抗干扰能力强,环境信息存储量小,决策速度快,但分辨率下降,在密集障碍物环境中发现路径的能力减弱.

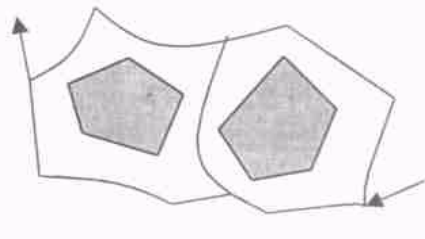


图 2 Voronoi 图  
Fig.2 Voronoi graph

不是对环境信息的精确计算来完成的,而是根据比较模糊的环境信息,靠经验来决策采取什么样的操作.模糊逻辑算法基于实时传感器的信息,参考人的驾驶经验,通过查表得到规划出的信息,完成局部路径规划.该法克服了势场法易产生局部极小的问题,计算量不大,易做到边规划边跟踪,适用于时变未知环境下的路径规划,实时性较好.遗传算法(GA)是 Holland 教授于 1962 年首先提出的.遗传算法是一种基于自然选择和基因遗传学原理的搜索算法.遗传算法借鉴物种进化的思想,将欲求解的问题进行编码,每一个可能解均被表示成字符串的形式,初始化随机产生一个种群(Population)<sup>[18,19]</sup>的候选群,种群规模固定为 N,用合理的适应度函数(Fitness Function)<sup>[18,19]</sup>对种群进行性能评估,并在此基础上进行繁殖(Repopulation)<sup>[18,19]</sup>、交叉

(Crossover)<sup>[18,19]</sup>和变异(Mutation)<sup>[18,19]</sup>遗传操作。适应度函数类似于自然选择的某种力量,繁殖、交叉和变异这三个遗传算子则分别模拟了自然界生物的繁衍、交配和基因突变。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。遗传算法用于复杂环境下路径规划存在以下缺陷:(一)路径个体编码设计若不合理,会导致进化缓慢。进化过程中产生非法个体;(二)若遗传算子选择不合理,进化效果不明显;(三)若规划过程中没有利用背景知识,进化效率不高。

### 3.3 多传感器信息融合<sup>[2,13-17,22]</sup>

传感器作为移动机器人获取环境信息的接口,在机器人导航系统中起着举足轻重的作用。由于单一传感器信号难以保证输入信息的准确性和可靠性,不足以反映外界环境信息,致使机器人无法做出正确的决策,而采用多个传感器则有很多优点,如多个传感器可提供同一环境的冗余信息和互补信息;多信息可以并行快速地分析现场环境;在某一传感器发生故障时,可迅速重组,重新投入工作。多传感器信息融合便是针对一个系统中使用多个或多类传感器这一特定问题而展开的一种信息处理的新的研究方向,其目的是通过一定的技术手段,充分利用多数据源的互补性和计算机的高速运算来提高信息处理结果的质量,保证机器人系统的快速性和准确性。

移动机器人的多传感器信息融合技术的研究始于 20 世纪 80 年代,也形成了很多方法。

常用的方法有:加权平均法、贝叶斯估计、多贝叶斯方法、卡尔曼滤波、D-S 证据推理、模糊逻辑、产生式规则、人工神经网络等。

加权平均法是将多个传感器的信息数据进行加权平均,是一种最简单、最直观的多传感器底层数据融合方法,一般用于对动态底层数据进行处理,缺点是难以取得最佳权值,权值的获取往往需要大量的实验,其结果不是统计上的最优估计。

采用一致传感器的贝叶斯估计方法是融合静态环境中的多传感器底层数据的一种常用方法,其原理是根据已发生的事实对未发生的事件进行概率的判断,首先去除可能有错的传感信息,然后对剩下的“一致传感器”提供的冗余信息进行融合处理,适用于具有高斯白噪声的不确定性传感信息融合,一般只能对相同特征的信息进行合理的数据融合。

在多贝叶斯方法中,将所有传感器视为一个由多个决策者组成的小组,这些传感器必须确定该小

组一致的结果,适用于静态环境。

卡尔曼滤波用于实时融合动态低层传感器数据,该方法用测量模型的统计特性递推决定统计意义下最优融合数据估计。如果系统具有线性动力学模型,且系统噪声和传感器噪声是高斯分布的白噪声模型,卡尔曼滤波为融合数据提供唯一的统计意义下的最优估计。卡尔曼滤波具有计算速度较快,所需存储空间不大的优点,因而在多传感器数据融合领域中应用得非常成功。

D-S 证据推理是由 A. P. Dempster 最先提出的,后来由他的学生 G. Shafer 进一步发展完善。D-S 推理方法是贝叶斯方法的扩展,它不需要验前概率,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。

模糊逻辑是一种多值逻辑,它从区间(0,1)中选取一个实数来表示真实度,从而将多传感器数据融合过程中的不确定性直接表示在推理过程中,然后用模糊逻辑来处理不确定信息。适用于静态环境,可处理冗余和互补信息。模糊逻辑的运算量随规则数量的增加而成几何级数增长,因而在模糊规则较多时难以付诸实施。

产生式规则可以用来表示对象特征与传感信息之间的关系,然后用和规则相关的信任系数表示信息的不确定性。

以上方法中,前四种采用概率的方法来表示信息,后三种采用命题的方法来表示信息。

人工神经网络是一种仿效生物神经网络的信息处理方法。神经网络的优点主要体现在它可以处理难以用模型或规则描述的过程和系统;对非线性系统具有统一的描述;具有较强的信息融合能力和系统容错能力。基于神经网络的多传感器信息融合正是利用了神经网络这些特性,将传感器的数据信息作为神经网络的输入进行处理,可以获得移动机器人对障碍物影像的比较精确的估计。神经网络系统受学习样本的影响很大,选择代表性强的样本集是十分困难的,而让样本集覆盖整个样本空间是不现实的,因而样本的选择与设计是一大难题。

## 4 移动机器人导航技术展望 (Future development of mobile robot navigation technology)

随着计算机技术、传感技术、控制技术、材料技术的发展,特别是网络技术和图像信息处理技术的迅猛发展,自主式移动机器人智能导航的研究已取

得了丰硕的研究成果,其应用领域不断扩大,应用的复杂程度也越来越高,因此对移动机器人导航及其相关技术提出了许多新的要求。

(1) 视觉导航具有探测范围广、目标信息完整等优点,仍是今后导航技术的主要发展方向。视觉导航技术已取得了研究成果,但由于现有计算设备的运算速度和存储容量的限制,其中的图像处理速度慢始终没有得到很好解决,相信随着计算机技术的发展以及对静态和动态图像信息的处理方法研究的深入,这一问题最终将得到解决。

(2) 移动机器人执行任务时,系统的实时性是不容忽视的问题。上述的图像处理技术以及模式识别的研究将有助于这一问题的解决。

(3) 在很多应用场合,要求移动机器人体积小、自重轻、负载能力强,因而需要开展导航系统的分布式结构研究。所谓分布式结构是指通过网络把机器人的决策级操作分解到机器人自身的计算机和远端的主计算机。机器人把采集到的视觉信号和传感信号按照一定的标准合成,再传送到远端的计算机上进行分析处理,然后发出控制信号以控制机器人执行相应操作。这样既可以提高系统的鲁棒性,也减小了机器人的体积和自重。

(4) 常规传感器和多传感器信息融合技术在移动机器人导航中的应用已取得了许多重大成果,但在一些特殊的环境中,非视觉传感器的探测范围和精度与视觉导航系统相比不是很理想,对于一些高精度的导航任务还不能胜任,因而需要开发出新型传感器及提出新的信息融合方法来弥补不足。

(5) 导航系统的模块化问题。由于机器人的导航工作可以分解成若干低层工作,因此研究机器人导航的通用接口模块是今后研究的一个重要课题。

(6) 目前,多机器人系统<sup>[2,21]</sup>是机器人技术发展的主要方向。多机器人系统的导航,则是研究的重点,已经提出了由利用空间通信手段的控制中心发送指令的控制方案来实现多机器人系统的导航。

(7) 网络技术现在已渗透到人类社会的各个领域,网络机器人<sup>[23]</sup>也就随之产生。基于网络的机器人控制就是利用互联网实现远程的机器人控制,其导航问题也是智能机器人导航技术一个研究方向。

#### 参考文献 (References)

- [1] 白井良明著,王棣棠译[M]. 机器人工程. 科学出版社, 2001年2月.  
 [2] 李磊,叶涛,谭民,陈细军. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人, 2002,24(5): 475 - 480.

- [3] 马兆青,袁曾任. 基于栅格方法的移动机器人实时导航与避障[J]. 机器人, 1996,18(6): 344 - 348.  
 [4] 崔茂源,田彦涛,赵中祺. 基于模糊逻辑的自主移动机器人实时滚动路径规划及控制[J]. 吉林工业大学自然科学学报, 1999,(1): 58 - 63.  
 [5] 马明山,朱绍文,何克忠,李相伟. 室外移动机器人定位技术研究[J]. 电工技术学报, 1998年4月, 43 - 46.  
 [6] 李开生,张慧慧,费仁元,宗光华. 定位传感器及其融合技术综述[J]. 计算机自动测量与控制, 2001年9月, 1 - 3.  
 [7] 王宏,张钺. 基于地图的室外移动机器人路径规划和导航系统[J]. 机器人, 1994,16(1): 24 - 29.  
 [8] Li Wei. Behavior based control of a mobile robot in unknown environments using fuzzy logic[J]. Control Theory and Applications, 1996年4月, 153 - 161.  
 [9] JAMES F. GIL DE LAMADRID & MARIA L. GINI. Path tracking through uncharted moving obstacles[A]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics[C]. 1990年11月, 1408 - 1422.  
 [10] Khatib. Real-time Obstacle for manipulators and mobile robot[J]. The International Journal of Robotic Research. 1986年5月, 90 - 98.  
 [11] 欧阳正柱,何克忠. GPS在智能移动机器人中的应用[J]. 微计算机信息, 2001年11月.  
 [12] 赵翊捷,陈卫东. 基于地图的移动机器人定位技术新进展[J]. 上海交通大学学报, 2002年10月, 1435 - 1438.  
 [13] 姜若愚,范丰仙. 智能机器人传感器的研究评述[J]. 湖南大学学报, 1994年10月, 96 - 100.  
 [14] 肖海荣,富文军,张晓军,周凤余,李贻斌等. 基于多传感器数据融合的移动机器人导航[J]. 系统工程与电子技术, 2001,(7): 66 - 69.  
 [15] 王军,苏剑波,席裕庚. 多传感器集成与融合概述[J]. 机器人, 2001,23(2): 183 - 192.  
 [16] 李瑞峰,李伟招. 基于多传感器信息融合的移动机器人路径规划[J]. 机电一体化, 2002,(4): 20 - 23.  
 [17] 李贻斌,刘明,周凤余,李彩虹,苏学成. 移动机器人多传感器信息融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 1999,(9): 55 - 57.  
 [18] 张乃尧,阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 清华大学出版社. 1998年10月.  
 [19] 李智军,吕恬生. 遗传算法在自主移动机器人局部路径规划中的应用[J]. 机械设计, 2000年7月, 26 - 29.  
 [20] 任华瑛,胡跃明,池瑞楠. 基于遗传算法的最优模糊控制器在非完整移动机器人轨迹跟踪中的应用[J]. 机器人技术与应用, 24 - 28.  
 [21] 徐国华,谭民. 移动机器人的发展现状及其趋势[J]. 机器人技术与应用, 2001,(3): 7 - 14.  
 [22] 李玉榕,郭智疆,蒋静坪,何文欢. 多传感器融合在移动机器人运动控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2002年2月, 106 - 110.  
 [23] 庄严,王伟,恽为民. 基于网络的机器人控制技术研究现状与发展[J]. 机器人, 2002,24(3): 276 - 282.

#### 作者简介:

王志文(1976-),男,甘肃工业大学硕士研究生.研究领域:机器人理论与技术、智能控制等。

郭戈(1972-),男,甘肃工业大学博士,副教授,甘肃省333科技人才及555人才,甘肃省高校跨世纪学科带头人.研究领域:机器人理论与技术、智能系统与控制理论等。