

程磊 著

及其

协调控制

移动机器人系统



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

程磊 著

及其
协调控制

移动机器人系统



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书对移动机器人及其协调控制系统进行了系统论述。第1章综合论述了移动机器人的感知与定位理论及技术。第2章阐述了移动机器人的运动控制理论及硬件驱动技术,建立了移动机器人的数学模型。第3章对移动机器人协调控制的基础理论加以分类描述,作为其后移动机器人协调控制的研究基础。第4章至第6章从刚性编队控制、基于势场原理的群集运动控制算法及分级智能体结构多任务协调控制等不同角度介绍了几类移动机器人协调控制系统实例,并以目前广泛关注的物联网技术为基础,探讨了物联网环境下的移动机器人协调控制原理及其初步应用。

本书可作为移动机器人结构及多机器人学系统设计方法学相关学者的参考书,也可以供控制及机器人等相关研究方向的研究生研读。

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人系统及其协调控制/程磊著. —武汉:华中科技大学出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5609-9612-7

I. ①移… II. ①程… III. ①移动式机器人-机器人控制-协调控制-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 002607 号

移动机器人系统及其协调控制

程 磊 著

策划编辑:王红梅

责任编辑:熊 慧

封面设计:三 禾

责任校对:马燕红

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉楷轩图文

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:9.25

字 数:194千字

版 次:2014年3月第1版第1次印刷

定 价:32.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

机器人学是一门综合性学科,涉及仿生学、机械学、力学、材料学、计算机和控制学等多门学科,移动机器人是一种由传感器、遥控操作器和自动控制的移动载体组成的机器人系统。移动机器人具有移动功能,在代替人从事危险、恶劣(如辐射、有毒等)环境下作业和人所不及的(如宇宙空间、水下等)环境作业方面,比一般机器人有更大的机动性、灵活性,已成为国内外机器人学的热点研究问题。

同时,机器人协调控制亦是机器人学发展的一个新方向。一方面,由于某些任务的复杂性,单个机器人会因为自身有限的而无法完成全部的工作,在这种情况下,多个机器人可以通过相互之间的协调共同完成任务。另一方面,通过多机器人间的协调,可以提高机器人系统的作业效率。在多机器人系统的研究中,多移动机器人系统的协调控制始终是一个热点主题,也是该领域中一个基础性的研究方向。

本书的特点是对移动机器人及其协调控制系统进行了系统论述,以笔者近年来在相关领域的研究成果为基础,对移动机器人方向的基础理论和实现技术进行了合理归纳和分析探讨,内容丰富实用、简明扼要。从内容的组织上,本书既可为移动机器人研究人员提供借鉴,亦可作为高年级本科生及研究生在相关课程教学中的综合性教材。

全书研究内容分为移动机器人本体与移动机器人协调控制两部分,共6章,各章节内容概述如下:

第1章综合论述了移动机器人的感知与定位理论及技术,包括基于距离传感器的环境感知、机器视觉、机器嗅觉及感知信息融合技术;在此基础上,介绍了机器人的定位方法,包括自定位技术、同步定位与构图技术(SLAM)。

第2章论述了移动机器人的运动控制理论及硬件驱动技术,建立了移动机器人的数学模型,探讨了一般智能体与移动机器人之间的控制转换方法,并对机器人运动规划、基于行为的运动控制等关键技术进行了阐述,实现可控的移动机器人运行。

第3章对移动机器人协调控制的基础理论加以分类描述,并以移动机

机器人之间的通信机制为基础,引入基于智能体构架的移动机器人协调控制理念,具体介绍了智能体内部结构、运动协调系统构架及多个体协调避碰机制,其后的移动机器人协调控制研究均以此为基础展开。

第4章至第6章从不同角度介绍了几类移动机器人协调控制系统实例。

第4章研究了基于 $l-\varphi$ 闭环控制律的移动机器人刚性编队控制系统及其改进算法,对刚性编队的 leader-follower 基本稳定性问题进行分析与综合,并论述了面向 $l-\varphi$ 闭环控制律的多机器人避障算法,最后对多移动机器人运动协调中的容错控制问题进行了初步探讨。

第5章阐述了基于势场原理的移动机器人群集运动控制算法及其性能评价方法,并对未知环境下的移动机器人群集运动协调避障问题提出了相应的解决方案。

第6章概括介绍了网络化机器人协同工作控制,包括移动机器人多任务协调控制以及物联网环境下的多移动机器人协调控制,并以“无人战车协同作战”实例来说明基于分级智能体结构的多任务协调控制系统的设计与实现过程,其中包含了基于“势点”的多移动机器人协调围捕/拦截策略的描述。另外,以目前广泛关注的物联网技术为基础,探讨了物联网环境下的移动机器人协调控制原理及其初步应用。将移动机器人协调控制理论与物联网系统相结合,是一个新的研究方向,有着十分重要的理论意义和实践价值。

本书集中了笔者在华中科技大学和武汉科技大学从事移动机器人研究工作的一点心得,是在笔者博士学位论文的基础上,融合了部分现有工作成果,进一步整理和发展而来的。移动机器人及其协作理论飞速发展,笔者的工作仅仅是对这方面的粗浅尝试,许多内容尚需完善,书中不妥之处在所难免,还望专家不吝批评指正。也衷心希望笔者的工作能起到抛砖引玉的作用,为更多读者的研究提供一些有益的借鉴。

作者

2013年12月

目 录

1 移动机器人感知与定位	(1)
1.1 移动机器人环境感知	(1)
1.1.1 距离感知	(2)
1.1.2 机器视觉	(4)
1.1.3 机器嗅觉	(8)
1.1.4 感知信息融合	(14)
1.2 移动机器人定位	(16)
1.2.1 自定位	(16)
1.2.2 同步定位与构图	(18)
2 移动机器人控制	(28)
2.1 数学模型及分析	(28)
2.2 虚拟力控制	(30)
2.3 运动规划	(32)
2.4 基于行为的控制技术	(35)
2.5 驱动系统	(43)
3 移动机器人协调控制基础	(51)
3.1 协调控制理论研究	(52)
3.1.1 分布式控制算法	(52)
3.1.2 分布式人工智能方法	(54)
3.2 移动机器人通信	(55)
3.3 基于智能体通信架构的协调控制系统	(57)
3.3.1 智能体内部结构	(58)
3.3.2 基于通信的运动协调系统架构	(59)
3.3.3 基于通信的协调避碰机制	(60)
4 移动机器人刚性编队控制	(67)
4.1 基于 $t-\varphi$ 闭环控制律的移动机器人刚性编队	(68)
4.1.1 leader-follower 刚性编队的稳定性分析	(70)
4.1.2 移动机器人刚性编队实验的软件及硬件实现	(72)
4.2 引入势点的刚性编队	(78)



4.3	面向 $l-\varphi$ 闭环控制律的多机器人避障算法	(83)
4.4	面向刚性编队的容错控制	(86)
4.4.1	队形分级图	(86)
4.4.2	容错队形重构	(87)
5	移动机器人群集运动控制	(92)
5.1	基于势场原理的移动机器人群集运动	(93)
5.1.1	无 leader 群集运动	(93)
5.1.2	有序化群集运动	(95)
5.1.3	基于“最小稳定时间”的群集运动性能分析	(96)
5.1.4	仿真与实验	(97)
5.2	移动机器人协调避障	(105)
5.2.1	多移动机器人群集运动中的联合势场法避障算法	(105)
5.2.2	融合沿墙行为的多移动机器人避障运动	(108)
5.2.3	基于 Backstepping 的多移动机器人群集运动系统	(110)
6	网络化移动机器人协同工作控制	(119)
6.1	移动机器人分层协调控制结构	(119)
6.2	移动机器人分层协调控制系统实验研究	(121)
6.2.1	实验设计	(121)
6.2.2	基于势点的多移动机器人协调围捕/拦截策略	(122)
6.2.3	实验	(126)
6.3	物联网环境下的多移动机器人协调控制	(130)
6.3.1	物联网技术概述	(131)
6.3.2	物联网环境下的多移动机器人群集运动系统	(133)
6.3.3	物联网环境下的多移动机器人协作环境探索	(136)
6.3.4	小结	(139)



移动机器人感知与定位

在人类活动中,有很多简单而重复的工作;在人类探索中,存在着极限的情况,限制着人类的活动。所以人们想到应用机器来代替人类完成这样的工作,从而产生了对机器人的研究。机器人的研究是涉及机械学、材料学、力学、控制学、计算机等多门学科的一种综合性研究。正由于各种学科综合,才促进了机器人学的发展。

移动机器人指的是能够通过传感器感知自身状态和外界环境信息,自主地在有障碍物的复杂环境中避开障碍物而奔向目标,并具有完成任务功能的一种机器人系统。目前,移动机器人不仅在农业、工业领域应用广泛,在航天、医学领域,甚至在人类日常的生活中都展现出了广泛的应用前景。

1.1 移动机器人环境感知

感知是一种局部的交互,是机器人获取信息的一种重要途径,对于保障系统在部分未知或完全未知工作环境下的动态运行至关重要。环境信息获取的精确与否将直接影响机器人决策的好坏。移动机器人通过配备在本体或外部的传感器来感知外界环境,这类传感器主要包括声纳系统、激光测距仪(激光雷达)、机器视觉系统、机器嗅觉系统等。

1.1.1 距离感知

传感器是能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。针对距离和障碍的探测,目前传感器主要采用光电管、声纳和激光测距仪。

光电传感器是利用光电器件把光信号转换成电信号的装置。光电传感器工作时,先将被测量转换为光量的变化,然后通过光电器件把光量的变化转换为相应的电量变化,从而实现非电量的测量。光电式传感器的核心(敏感元件)是光电器件,光电器件的基础是光电效应。光电式传感器结构简单,响应速度快,可靠性较高,能实现参数的非接触测量。常用的光电转换元件有真空光电管、充气光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电池、光电二极管及光电三极管等,它们的作用是检测照射其上的光通量。选用何种形式的光电转换元件取决于测量被测参数所需的灵敏度、响应速度、光源特性及测量环境和条件等。在微小型移动机器人系统设计中,使用较普遍的光电传感器就是光电管,即利用光电管简单测量障碍物与机器人本体的距离,进而实现避障动作,其结构如图 1.1 所示。

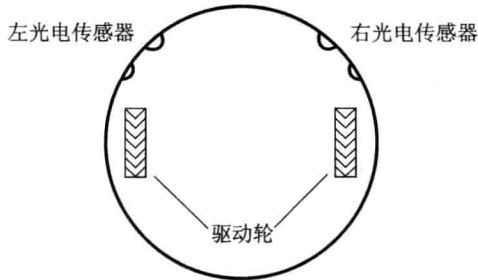


图 1.1 光电管结构图

近些年,由于声纳系统处理信息简单、快速,且价格低,因此广泛应用于各种移动机器人。声纳系统是一个时间快速系统。当声波超出一定的门槛电平时,给出的范围有效。声波幅值依赖于返回波的倾斜角度,在一定的射线开放角度范围内,能够测量物体间的最短距离^[1]。然而,当倾斜角太大时,返回波就会被反射掉。所以,移动机器人本体上的声纳系统通常是以组的形式存在的,而不是单个存在的。但声纳具有一定的局限性:对环境的感知较粗糙,表现在探测波有效角较小,方向性差;往往只能获得数字地图与路径规划目标的距离信息,不能提供目标边界信息;单一传感器的稳定性不理想等。

激光测距是接近觉的一种。通过二维的激光扫描束,激光测距仪能够以较高的频率提供大量的、准确的距离信息。与其他距离传感器相比,激光测距仪能够同时兼顾精度要求和速度要求,不易受环境光照影响,可以在黑暗中工作,而且在黑暗中测量效果更好。此外,激光测距仪具有测距精度相对较高、方向性好、镜面反射小等优点,但激光测距仪造价高、功耗大。

下面以 ActivMedia 公司的 Pioneer 系列机器人为例介绍。

1. 声纳环

声纳环由 16 个声纳传感器呈环形排列,对机器人进行 360° 范围探测,包括 Front Sonar Ring 和 Rear Sonar Ring 两部分,每部分含有 8 个声纳传感器。图 1.2 所示的为前声纳环的阵列分布,8 个声纳传感器的排列是左右各一,其余 6 个按 20° 的间隔均匀分布,扫描顺序从右至左。可对每个声纳进行独立操作,单个声纳传感器的测量范围为 $15\text{ cm}\sim 7\text{ m}$,测量精度可控制在 $10\text{ cm}\sim 5\text{ m}$ 的误差范围内。

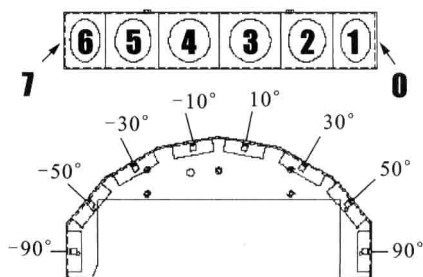


图 1.2 移动机器人声纳环分布

2. 激光测距仪(激光雷达)

激光测距是接近觉的一种。Pioneer 2 机器人配备的激光测距仪是德国 SICK 光电子公司生产的 LMS 200,其外观如图 1.3 所示。LMS 200 是脉冲式 TOF(time-of-flight)激光测距仪,其工作原理如图 1.4 所示,即通过从发送激光束到接受反射光的时间间隔来计算障碍物的距离。其测距范围为 $50\sim 150\text{ m}$,距离分辨率为 $10\sim 50\text{ cm}$,水平视场为 $100^\circ\sim 180^\circ$ 。根据角度的不同,其响应时间为 $13\sim 80\text{ ms}$ 。LMS 200 的主要特点有:具有较高的精度,通过二维激光扫描束,激光测距仪能够以较高的频率提供大量的、准确的距离信息;与其他距离传感器相比,激光测距仪能够同时兼顾精度要求和速度要求;对环境光没有要求,而且在黑暗中测量效果更好。



图 1.3 LMS 200 激光测距仪

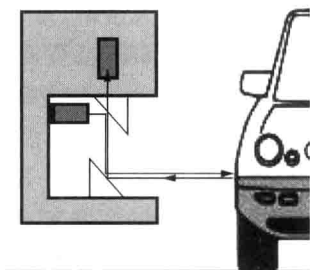


图 1.4 LMS 200 的工作原理

1.1.2 机器视觉

视觉信息是人类感知环境世界的主要途径,也是移动机器人感知环境世界的关键技术^[2],其硬件基础即为图像传感器,又称成像器件或摄像器件,可实现可见光、紫外线、X射线、近红外光等的探测,是现代视觉信息获取的一种基础器件。因其能实现信息的获取、转换和视觉功能的扩展(光谱拓宽、灵敏度范围扩大),能给出直观、真实、多层次、多内容的可视图像信息,图像传感器在现代科学技术中得到越来越广泛的应用。固态图像传感器是在同一块半导体衬底上布设若干由光敏单元与移位寄存器构成的器件,是一种集成化、功能化的光电器件。光敏单元又称为像素或像点。不同的光敏单元在空间上、电气上彼此独立。每个光敏单元将自身感受到的光强信息转换为电信号,众多的光敏单元一起工作,即把入射到传感器整个光敏面上、按空间分布的光学图像转换为按时序输出的电信号“图像”,这些电信号经适当的处理,能再现入射的光辐射图像。固态图像传感器主要有五种类型:电荷耦合器件 CCD(charge coupled device)、电荷注入器件 CID(charge injection device)、金属-氧化物半导体 MOS(metal-oxide semiconductor)、电荷引发器件 CPD(charge priming device)和叠层型摄像器件(laminated type camera device)。在智能车系统设计中,用到的图像传感器主要有电荷耦合器件 CCD(charge coupled device)和互补性金属-氧化物半导体 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor)两种。

视觉系统按其在移动机器人中的应用方法可分为主动视觉和被动视觉。主动视觉通常是利用激光或红外发生器发射可见或不可见的光束,然后由摄像头采集相应的图像,最后对图像进行分析和处理。被动视觉不向外发射光束,只采集外界的图像进行分析。视觉系统按视觉传感器的个数

来划分,可以分为单目视觉系统、双目视觉系统和多目视觉系统。在单目视觉系统中,机器人只通过一个视觉传感器来获取外界的视觉信息,该系统处理比较简单,在非特定的环境中只能获得二维空间的信息;而双目和多目视觉系统比较复杂,一般具备获取三维空间信息的能力,但实时性相对较差。

1. 目标的获取

目标的获取即在摄像机采集的图像中搜索是否有特定目标,并提取目标范围,给出目标在图像中的位置特征点。考虑到机器人控制实时性的需要(机器人行为周期为 100 ms),过于耗时的复杂算法是不实用的。因此以颜色信息为目标特征,辅以快速的滤波和形状判别算法来获取目标是可行的。为此需设定以下限制条件:

- (1) 目标特征颜色与背景有明显差别;
- (2) 目标应与地面接触,特征颜色取接触地面部分的颜色;
- (3) 目标在采集图像中应占有一定面积。

为获取鲁棒性较好的颜色特征,减少光线条件对识别的影响,将采集到的图像中 RGB 格式的数据转换到 HSV 空间,以色度和饱和度为特征值,设定其阈值以设定特征颜色,分割出由特征颜色点构成的目标连通区,并计算目标连通区的特征点,这个特征点的位置即可代表目标在环境中的实际位置。

2. 目标的定位

由于单目视觉丢失了深度信息,因此即使知道空间某点的图像点的坐标和投影矩阵,其空间坐标也不是唯一确定的,它对应的是空间的一条直线。但实际上,该实验是基于室内环境的,机器人的所有移动都在一个平面上,可以事先知道摄像机坐标系的几何参数,如离地面的高度及摄像机光轴与水平面的夹角。这等于知道了摄像机坐标系与水平世界坐标系的位置关系。于是,图像点对应的空间直线与水平面的交点就是其对应的空间点。这一约束条件为实现机器人视觉的三维重建提供了可能^[3]。

图 1.5 显示了上述三维重建原理,图中的 O 点为摄像机的光心,其摄像机坐标系为 $X_c Y_c Z_c$,光轴(Z_c 轴)为 $O_1 O O'$, $\overline{O_1 O}$ 为摄像机的焦距 f , O_1 为摄像机坐标系的坐标原点, O' 为光心 O 在地面上的投影, $O O'$ 为摄像机光轴在水平面上的投影。 B 点为目标与地面接触的某一点(可定义为特征点),其在 $O O'$ 上的投影点为 A , D 点为 A 点在摄像机光轴上的投影, C 点为 B 点在摄像机平面上的投影, A 、 B 、 C 和 D 点在图像中的投影分别为

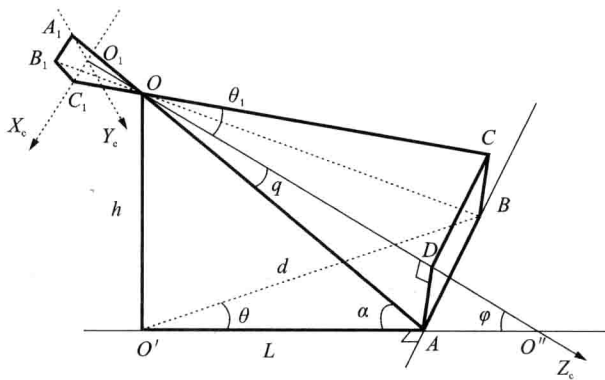


图 1.5 基于水平面的三维重建原理图

A_1 、 B_1 、 C_1 和 O_1 。已知量有:测量得到的摄像机光心离地面的距离 $\overline{OO'} = h$,摄像机光轴与水平面的夹角,即摄像机的俯仰角 φ ,以及由摄像机标定得到的摄像机焦距 f (实际上,由于摄像头成像畸变,横轴和纵轴上的焦距会有微小差异,分别记作 f_x 和 f_y)。由上述参数,结合对图 1.5 的空间几何分析,可以得到以下公式:

$$q = \arctan(\overline{O_1A_1}/\overline{O_1O}) = \arctan(B_{1y}/f_y) \quad (1-1)$$

$$\alpha = \varphi + q \quad (1-2)$$

$$y = L = \overline{OA} = \overline{OO'}/\tan\alpha = h/\tan\alpha \quad (1-3)$$

$$\overline{OD} = \overline{OA} \cos q = \sqrt{h^2 + L^2} \cos q \quad (1-4)$$

$$x = \overline{AB} = \overline{CD} = \overline{OD} \tan\theta_1 = \overline{OD} \cdot (C_1O_1/f_x) = \overline{OD} \cdot B_{1x}/f_x \quad (1-5)$$

可以得到 B 点离摄像头的距离 d 和角度 θ 为

$$d = \overline{OB} = \sqrt{x^2 + L^2} \quad (1-6)$$

$$\theta = \arctan(x/L) \quad (1-7)$$

式中: θ 为偏角,当目标点在机器人前方的左侧时为正,在右侧时为负;像平面 $A_1B_1C_1O_1$ 的长度计量单位为像素,物平面 $ABCD$ 的长度计量单位为实际长度单位(mm)。

假设目标的特征点不为其与地面的接触点,已知该特征点距地面的实际高度为 H ,则有

$$h' = h - H \quad (1-8)$$

将 h' 代替式(1-3)、式(1-4)中的 h ,可获得高于地面的特征点坐标值 (x, y) 。 (x, y) 即为侦察机器人所获得的目标在其视场内的位置信息。

机器视觉是研究计算机模拟生物宏观视觉功能的科学和技术,即用摄



像机和计算机等机器代替人眼对目标进行测量、跟踪和识别,并加以判断。机器视觉是人工视觉,又可称为工业视觉或计算机视觉,与人类视觉或动物视觉有着本质的不同。也有人认为机器视觉是计算机视觉工业应用的一个分支。机器视觉与机器人结合主要用于机器人的定位与导航中,其原理是通过摄像机获取周围景物的图像,利用景物中一些自然的或者是人造的特征,通过图像处理方法得到周围环境模型来实现摄像机自身位置的确定。该方法在实时数字摄影测量、机器人运动导航、飞行器主动视觉定位等领域具有重要的使用价值。在所有基于视觉原理的空间定位方法中,单目视觉测量算法具有结构简单、标定步骤少等优点,同时还避免了立体视觉方法中的视场小、立体匹配难等缺陷。单目视觉空间定位的常见方法有结构光法^[4]、几何光学法^[5]、辅助测量棒法^[6]、激光辅助测距法^[7]、几何形状约束法^[8]等。由于视觉传感器结构限制,上述大多数方法只有在对定位参照物进行近距离成像的情况下比较才有效^[9]。在单目视觉定位的一般应用中,都需要对摄像机的运动轨迹进行连续追踪定位,即在定位追踪要求的一定时间间隔中,及时计算各个时间节点上成像摄像机的空间位置及相对标志物的位置偏移量,引导应用平台(如机器人、飞行器等)按设计路线不断校正前进方向及相对目标位置,以准确完成设计任务。

双目视觉是机器立体视觉的一种重要形式。它是基于视差原理并利用成像设备从不同的位置获取被测物体的两幅图像,通过计算图像对应点间的位置偏差,来获取物体三维几何信息的方法。融合两只眼睛获得的图像并观察它们之间的差别,使我们可以获得明显的深度感,建立特征间的对应关系,将同一空间物理点与在不同图像中的映像点对应起来。双目视觉测量方法具有效率高、精度合适、系统结构简单、成本低等优点,非常适合于制造现场的在线、非接触产品检测和质量控制。对运动物体(包括动物和人体的形体)测量时,由于图像获取是在瞬间完成的,因此立体视觉方法是一种更有效的测量方法。双目视觉是计算机视觉的关键技术之一,获取空间三维场景的距离信息也是计算机视觉研究中最基础的内容。

双目视觉的开创性工作始于20世纪60年代中期。美国MIT的Roberts通过从数字图像中提取立方体、楔形体和棱柱体等简单规则多面体的三维结构,并对物体的形状和空间关系进行描述,把过去的简单二维图像分析推广到了复杂的三维场景,标志着立体视觉技术的诞生。随着研究的深入,研究的范围从边缘、角点等特征的提取,线条、平面、曲面等几何要素的分析,直到对图像的明暗、纹理、运动和成像几何等进行分析,并建立起各种数据结构和推理规则。特别是20世纪80年代初,Marr首次将图像



处理、心理物理学、神经生理学和临床精神病学的研究成果从信息处理的角度进行了概括,创立了视觉计算理论框架。这一基本理论对立体视觉技术的发展产生了极大的推动作用,在这一领域形成了从图像的获取到最终的三维场景可视表面重构的完整体系,使得立体视觉成为计算机视觉中一个非常重要的分支。经过几十年的发展,立体视觉在机器人视觉、航空测绘、反求工程、军事运用、医学成像和工业检测等领域中的运用越来越广泛。

在双目视觉的基础上,可增加一台或者多台摄像机作为辅助设备进行测量。Carl. Thomas^[10]采用六个高精度 CCD 面阵摄像机摄取图像,经过图像处理获取三维信息,再由曲面拟合构造 CAD 模型,但图像匹配算法尚未成熟。Saitot 等^[11]在发射光束周围均布三个 CCD 接收器,当被测面倾斜时,其中的一个或两个 CCD 可能由于接收不到漫反射光而没有信号输出,而靠别的 CCD 工作。对于三目视觉来讲,增加一台摄像机,有利于减少测量中的盲区,同时能尽可能地避免双目视觉中由于特征点模糊而产生的误匹配现象。

1.1.3 机器嗅觉

气味定位和跟踪在自然界普遍存在。许多生物利用气味来发现同类、进行交流、改变行为、躲避入侵者和搜寻食物等,比如,太平洋大马哈鱼靠嗅觉制导返回栖息地^[12],南极海鸟靠嗅觉觅食^[13],某些昆虫靠嗅觉交配和觅食^[14],人们借助狗的嗅觉去搜索毒品。受到生物学的启发,近年来,利用移动机器人寻找气体/气味源,即主动嗅觉,已经成为一个研究热点。其研究涉及移动机器人导航与控制、传感及信息处理、仿生学、计算智能和流体力学等多个领域,也是目前机器人感知模拟中的薄弱环节。在机器人嗅觉任务中,最主要的问题就是要对气味源进行搜索、定位、识别,其应用领域包括搜寻爆炸物、有毒/有害气体泄漏源查找、违禁品检查、防生化恐怖袭击、火灾报警等。目前,如何利用机器人嗅觉对可疑目标进行准确判断,迅速确定毒气泄漏源或可疑目标的具体位置,是应用移动机器人执行危险作业亟待解决的关键问题。由于机器人的运动性,它相当于组成一个移动传感器网络,相比固定传感器网络^[15],可以覆盖更大的范围,且其运动更灵活,可以成为一般传感器网络探测的有效补充;另外,机器人可被快速开发,维护费用低,可长时间工作,也不存在危险、注意力时间有限、易疲劳等问题。主动嗅觉在环境监测、大型工厂仓库保安等方面,可以主动对目标化学物质进行感知并确定其位置。这比一般的被动感知系统要有效得多。



移动机器人主动嗅觉系统的相关研究就是基于这种需要而展开的。

1. 嗅觉传感器选择

在选择气体传感器时,必须考虑以下几点要求:

- (1)选择性;
- (2)传感器还原;
- (3)高灵敏度、宽动态响应;
- (4)性能稳定;
- (5)响应快、重复性好。

2. 嗅觉传感器分类

气体传感器按照其气敏特性不同可以分成如下几类:电阻半导体型、电化学型、固态电解质型、接触燃烧型、光化学型等气体传感器,以前两种最为普遍。

1) 电阻半导体型气体传感器

以 SnO_2 、 ZnO 、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 、 MgO 、 NiO_2 等金属氧化物制成的气敏薄膜是一种阻抗器件,气体分子和敏感膜之间能交换离子,发生还原反应,引起敏感膜电阻的变化。作为传感器还要求这种反应必须是可逆的,即为了消除气体分子还必须发生一次氧化反应。传感器内的加热器有助于加速氧化反应进程。 SnO_2 薄膜气敏器件因具有良好的稳定性、能在较低的温度下工作、检验气体种类多、工艺成熟等优点,成为目前的主流产品。

2) 电化学型气体传感器

电化学型气体传感器是由膜电极和电解液灌封而成的。气体浓度信号将电解液分解成阴、阳带电离子,通过电极将信号传出。它的优点是,反应速度快、准确(可用于 10^{-6} 级),稳定性好,能够定量检测,但寿命较短(小于等于 2 年)。它主要适用于毒性气体的检测,目前国际上绝大部分毒气检测采用该类型传感器。

3) 固态电解质型气体传感器

固态电解质就是以固体离子导电为电解质的化学电池。固态电解质型气体传感器的选择性、灵敏度高于电阻半导体型气体传感器的,而其寿命又长于电化学型气体传感器的,所以也得到了广泛的应用,不足之处就是响应时间过长。由于固态电解质具有对 CO_2 气体的高选择性、寿命长、湿度依赖性极小等特点,故产品主要应用于农业大棚 CO_2 浓度检测、室内空气质量控制、发酵过程控制等。

4) 接触燃烧型气体传感器

接触燃烧型气体传感器只能测量可燃气体。可燃性气体(H_2 、 CO 、 CH_4 等)与空气中的氧接触,发生氧化反应,产生反应热(无焰接触燃烧热),使得作为敏感件的铂丝线圈温度升高,电阻值相应增大。其发热量与可燃性气体的浓度有关。空气中可燃性气体浓度愈大,氧化反应(燃烧)产生的反应热量(燃烧热)愈多,铂丝线圈的温度变化(增高)愈大,其电阻值增加得就愈多。因此,只要测定作为敏感件的铂丝线圈的电阻变化值(ΔR),就可检测空气中可燃性气体的浓度。但是,使用单纯的铂丝线圈作为检测元件,其寿命较短,所以,都是在铂丝线圈外面涂敷一层氧化物触媒。这样既可以延长其使用寿命,又可以提高检测元件的响应特性。

5) 光化学型气体传感器

光化学型气体传感器主要包括红外吸收型、光谱吸收型、荧光型等,以红外吸收型为主。由于不同气体对红外波吸收程度不同,因此可通过测量红外吸收波长来检测气体。目前因为结构关系,其造价一般颇高。

要进行一个具体的测量工作,首先要考虑采用何种原理的传感器。这需要分析多方面的因素之后才能确定。因为,即使是测量同一物理量,也有多种原理的传感器可供选用。至于哪一种原理的传感器更为合适,则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑以下一些具体问题:量程的大小;被测位置对传感器体积的要求;测量方式为接触式还是非接触式;信号的引出方法,是有线还是非接触测量(非接触测量不是无线测量,而是以光电、电磁等技术为基础,在不接触被测物体表面的情况下,得到物体表面参数信息的测量方法);传感器的来源,是国产还是进口。在考虑上述问题之后就能确定选用何种类型的传感器,只有为机器人选择合适的气体传感器,才能达到最好的嗅觉效果。

3. 机器嗅觉硬件设计

美国圣地亚哥大学的 Rozas 早在 1991 年就开始研制电子鼻^[16],进行气味搜索方面的研究。他把电子鼻安装到小型移动机器人上,使移动机器人具有气味跟踪的能力,并提出了气味浓度梯度算法,使机器人具有跟踪气体、寻找气味源的能力。从此,很多研究员开始了这方面的研究。1992 年,日本东京工业大学的 Ishida 和他的同事开始进行机器人嗅觉定位方面的研究。他们从飞蛾嗅觉行为中获得启示,提出了一种模仿飞蛾的嗅觉定位策略,制成了气味方向检测装置(嗅觉机器人 GaPTR-I 型)。该装置最初是由四个气味传感器和四个方向传感器组成的移动机器人,实现气味的