

光机电一体化丛书

# 机器人传感器 及其应用

高国富 谢少荣 罗均 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

光机电一体化丛书

# 机器人传感器及其应用

高国富 谢少荣 罗 均 编著



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

机器人传感器及其应用/高国富, 谢少荣, 罗均编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 7

(光机电一体化丛书)

ISBN 7-5025-7473-5

I. 机… II. ①高…②谢…③罗… III. 机器人-传感器  
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 080386 号

---

光机电一体化丛书

**机器人传感器及其应用**

高国富 谢少荣 罗 均 编著

责任编辑: 任文斗 周 红

文字编辑: 韩庆利 徐卿华

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 314 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7473-5

定 价: 35.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 《光机电一体化丛书》编辑委员会

主 任 林 宋

副主任 王生则 赵丁选 罗 均

委 员 (排名不分先后)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 林 宋 | 王生则 | 赵丁选 | 罗 均 | 胥信平 | 黎 放 |
| 胡于进 | 何 勇 | 谢少荣 | 高国富 | 崔桂芝 | 殷际英 |
| 方建军 | 郭瑜茹 | 徐盛林 | 文秀兰 | 周洪江 | 刘杰生 |
| 蒋 蓁 | 王 琦 | 杨野平 | 王东军 | 尚国清 | 叶天朝 |
| 戴 荣 | 刘 勇 | 裴晓黎 |     |     |     |

## 序

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合,是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面:光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品,具有很高的功能和附加值;光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用和发展的技术。

目前,国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业,光机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性,受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注,在提升传统产业的过程中,它以其高度的创新性、渗透性和增值性,成为未来制造业的支柱,被誉为21世纪最具魅力的朝阳产业。我国已经将发展光机电一体化技术列为重点高新技术发展项目。

随着光机电一体化技术的不断发展,各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。《光机电一体化丛书》第一批(共9册)的出版,受到了广大读者的欢迎。为满足读者的进一步需求,我们联合北方工业大学、上海交通大学、东华大学、华中科技大学、海军工程大学、北京机械工程学院、中国船舶工业集团船舶系统工程部、上海大学、吉林大学、江汉大学、河南理工大学等高校的教师及科研部门的工程技术人员编写《光机电一体化丛书》第二批(共21册),拟在2005年初开始陆续出版发行,主要内容为光机电一体化技术在测试传感、驱动控制、激光加工、精密加工、机器人等方面的应用,以满足科研单位、企业和高等院校的科研及生产和教学的需求,为有关工程技术人员在开发光机电一体化产品时,提供有价值的参考素材。

本丛书的基本特点是:①内容新颖,力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果;②系统全面,丛书分门别类地归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例,重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法;③深入浅出,每本书重点突出,注重理论联系实际,既有一定的理论深度,又具有很强的实用性,力求满足不同层次读者的需求,适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛,相关技术发展迅速,加之作者水平有限,时间紧促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请专家、学者和读者不吝赐教。

《光机电一体化丛书》编辑委员会

2004年10月于北京

# 前 言

近几十年来机器人技术的发展极为迅速，传统的以简单自动机械为基础的机器人技术，已经逐步转变为现代的信息技术与传统机械技术相结合的现代机器人技术。这种转变使得机器人的适用范围渗透到人类活动的各个领域。可以说，机器人技术是人类 20 世纪最伟大的几种技术之一。机器人由感知、决策和执行三部分组成，机器人的感知是机器人区别于其他自动化机器最为主要的方面，机器人的感知就是机器人传感技术。因此，本书将详细介绍机器人的传感技术。

本书首先从总体上介绍机器人传感器，然后系统地介绍了机器人手爪、工业机器人、并联机器人、移动机器人、飞行机器人、水下机器人等机器人系统中的各种特色传感器，及其在上述机器人系统中多传感器信息融合技术。全书共分 8 章，第 1 章从总体上介绍机器人传感器。第 2 章到第 4 章分别介绍了机器人手爪传感器、工业机器人传感器、并联机器人传感器。第 5 章到第 7 章分别阐述了移动机器人、飞行机器人、水下机器人的特色传感器。第 8 章介绍了机器人多传感器信息融合技术。

本书第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章、第 8 章由高国富博士编写；第 6 章由罗均博士编写；第 7 章由谢少荣博士编写；第 3 章由李小鸥副教授编写。全书由高国富博士统稿。

本书的编写得到了上海市科技启明星计划、国家自然科学基金和上海市教委青年基金的支持，同时，在本书的编写过程中，我们参阅和引用了国内外同行们的一些学术论文和著作，编者在此表示深深感谢。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正和讨论。

编 者

2005 年 5 月于上海

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>第 1 章 机器人传感器</b>   | 1  |
| 1.1 机器人与传感器           | 1  |
| 1.1.1 机器人技术           | 1  |
| 1.1.2 机器人传感器技术        | 1  |
| 1.1.3 我国机器人传感器的重点研究方向 | 2  |
| 1.1.4 机器人传感器技术的发展趋势   | 3  |
| 1.2 机器人传感器分类          | 4  |
| 1.3 内部传感器             | 4  |
| 1.3.1 位置传感器           | 4  |
| 1.3.2 角度传感器           | 5  |
| 1.4 触觉传感器             | 7  |
| 1.4.1 柔性触觉传感器         | 7  |
| 1.4.2 触觉传感器阵列         | 9  |
| 1.4.3 仿生皮肤            | 10 |
| 1.5 接近觉传感器            | 12 |
| 1.5.1 接触式接近觉传感器       | 12 |
| 1.5.2 感应式接近觉传感器       | 13 |
| 1.5.3 电容式接近觉传感器       | 14 |
| 1.5.4 超声波接近觉传感器       | 15 |
| 1.5.5 光电式接近觉传感器       | 16 |
| 1.6 听觉传感器             | 18 |
| 1.6.1 听觉传感器           | 18 |
| 1.6.2 语音识别芯片          | 19 |
| 1.7 嗅觉和味觉传感器          | 22 |
| 1.7.1 嗅觉传感器           | 22 |
| 1.7.2 味觉传感器           | 25 |
| <b>第 2 章 机器人手爪传感器</b> | 28 |
| 2.1 概述                | 28 |
| 2.1.1 视觉传感器           | 28 |
| 2.1.2 力/力矩传感器         | 31 |
| 2.1.3 滑觉传感器           | 34 |
| 2.2 美国机器人手爪传感系统       | 35 |
| 2.2.1 Utah/MIT 灵巧手传感器 | 35 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 2.2.2 多传感器集成手爪系统.....       | 36        |
| 2.3 德国多传感器手爪系统.....         | 38        |
| 2.3.1 ROTEX 多传感器机器人手爪 ..... | 38        |
| 2.3.2 DLR 灵巧手 .....         | 39        |
| 2.4 日本机器人手爪传感系统.....        | 43        |
| 2.4.1 多传感器智能手爪 ARH 系统 ..... | 43        |
| 2.4.2 营救机器人手爪传感系统.....      | 46        |
| 2.5 国内典型机器人手爪传感系统.....      | 49        |
| 2.5.1 EMR 手爪传感系统 .....      | 49        |
| 2.5.2 HIT 多传感器智能手爪系统 .....  | 50        |
| 2.5.3 BH-3 灵巧手 .....        | 51        |
| <b>第3章 工业机器人传感器 .....</b>   | <b>53</b> |
| 3.1 概述.....                 | 53        |
| 3.1.1 工业机器人.....            | 53        |
| 3.1.2 工业机器人传感器的分类.....      | 54        |
| 3.1.3 工业机器人对传感器的要求.....     | 54        |
| 3.2 装配机器人传感系统.....          | 56        |
| 3.2.1 位姿传感器.....            | 56        |
| 3.2.2 柔性腕力传感器.....          | 59        |
| 3.2.3 工件识别传感器.....          | 60        |
| 3.2.4 装配机器人视觉传感技术.....      | 61        |
| 3.2.5 多传感器信息融合装配机器人.....    | 62        |
| 3.3 焊接机器人传感系统.....          | 63        |
| 3.3.1 电弧传感系统.....           | 64        |
| 3.3.2 超声传感跟踪系统.....         | 65        |
| 3.3.3 视觉传感跟踪系统.....         | 67        |
| 3.4 管内作业机器人传感系统.....        | 69        |
| 3.4.1 煤气管道检测传感系统.....       | 69        |
| 3.4.2 石油管道检测传感技术.....       | 71        |
| 3.4.3 污水管道机器人传感技术.....      | 73        |
| 3.4.4 管道全程定位传感技术.....       | 75        |
| <b>第4章 并联机器人传感器 .....</b>   | <b>77</b> |
| 4.1 概述.....                 | 77        |
| 4.1.1 并联机构.....             | 77        |
| 4.1.2 并联机器人传感器.....         | 77        |
| 4.2 并联机器人力觉系统.....          | 78        |
| 4.2.1 力敏元件受力分析.....         | 78        |
| 4.2.2 集成拉压觉传感器.....         | 79        |
| 4.2.3 国内6维柔顺力/力矩传感器 .....   | 81        |
| <b>第5章 移动机器人传感器 .....</b>   | <b>83</b> |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5.1 移动机器人实时避障和导航传感器       | 83  |
| 5.1.1 移动机器人实时避障传感器        | 83  |
| 5.1.2 移动机器人导航系统           | 85  |
| 5.1.3 提高导航传感器精度的方法        | 86  |
| 5.1.4 几种典型移动机器人导航传感系统     | 88  |
| 5.2 Alfred 机器人传感系统        | 89  |
| 5.2.1 Alfred 的导航系统        | 89  |
| 5.2.2 Alfred 的视觉传感系统      | 90  |
| 5.2.3 Alfred 的声觉系统        | 91  |
| 5.3 Rover 机器人传感系统         | 92  |
| 5.3.1 Rover 机器人硬件系统       | 92  |
| 5.3.2 Rover 机器人传感系统       | 95  |
| 5.4 LIAS 机器人传感系统          | 98  |
| 5.4.1 LIAS 机器人系统组成        | 98  |
| 5.4.2 LIAS 机器人传感系统        | 98  |
| 5.5 Ranger NBV 机器人传感系统    | 100 |
| 5.5.1 Ranger NBV 的手臂      | 100 |
| 5.5.2 Ranger NBV 传感系统     | 101 |
| 5.6 国内移动机器人传感系统           | 104 |
| 5.6.1 CLIMBER 移动机器人传感系统   | 104 |
| 5.6.2 THMR-V 机器人传感系统      | 104 |
| 5.6.3 CITAVT-IV 移动机器人传感系统 | 105 |
| <b>第6章 飞行机器人传感器</b>       | 107 |
| 6.1 飞行机器人姿态传感器            | 107 |
| 6.1.1 气流式水平姿态传感器          | 107 |
| 6.1.2 压电谐振式水平姿态传感器        | 109 |
| 6.1.3 磁流体式水平姿态传感器         | 111 |
| 6.2 飞行机器人惯性传感器            | 112 |
| 6.2.1 加速度传感器              | 112 |
| 6.2.2 陀螺仪                 | 116 |
| 6.3 飞行机器人导航传感器            | 119 |
| 6.3.1 平台式惯性测量组合           | 119 |
| 6.3.2 捷联式惯性测量组合           | 120 |
| 6.4 智能传感器在飞行机器人中的应用       | 122 |
| 6.4.1 智能姿态传感器             | 122 |
| 6.4.2 智能加速度传感器            | 124 |
| 6.4.3 智能角速率陀螺             | 126 |
| 6.5 天线伺服跟踪系统              | 131 |
| <b>第7章 水下机器人传感器</b>       | 136 |
| 7.1 概述                    | 136 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7.1.1 水下机器人 .....                | 136 |
| 7.1.2 水下机器人传感器 .....             | 136 |
| 7.2 声呐传感系统 .....                 | 138 |
| 7.2.1 声呐传感系统的基本概念 .....          | 138 |
| 7.2.2 声呐传感系统的工作原理 .....          | 146 |
| 7.2.3 典型声呐传感系统 .....             | 151 |
| 7.3 水声换能器 .....                  | 153 |
| 7.3.1 PVDF 水听器 .....             | 153 |
| 7.3.2 光纤水听器 .....                | 154 |
| 7.3.3 其他新型水听器 .....              | 156 |
| 7.4 超短基线定位系统 .....               | 157 |
| 7.4.1 水下定位方法 .....               | 157 |
| 7.4.2 超短基线定位原理 .....             | 158 |
| 7.4.3 Sonardyne 超短基线水声定位系统 ..... | 159 |
| <b>第 8 章 机器人多传感器信息融合</b> .....   | 161 |
| 8.1 多传感器信息融合概述 .....             | 161 |
| 8.1.1 多传感器信息融合的定义 .....          | 161 |
| 8.1.2 多传感器数据融合的特点 .....          | 162 |
| 8.1.3 多传感器信息融合的关键问题 .....        | 162 |
| 8.1.4 多传感器信息融合的应用 .....          | 163 |
| 8.2 多传感器数据融合的功能模型 .....          | 164 |
| 8.2.1 White 功能模型 .....           | 164 |
| 8.2.2 JDL 模型 .....               | 166 |
| 8.2.3 多传感器信息融合过程 .....           | 167 |
| 8.3 多传感器信息融合的层次与结构模型 .....       | 169 |
| 8.3.1 像素级融合 .....                | 170 |
| 8.3.2 特征级融合 .....                | 170 |
| 8.3.3 决策级融合 .....                | 172 |
| 8.3.4 分布式融合 .....                | 173 |
| 8.3.5 集中式融合 .....                | 173 |
| 8.3.6 混合式融合 .....                | 174 |
| 8.4 多传感器信息融合算法 .....             | 175 |
| 8.4.1 算法分类 .....                 | 175 |
| 8.4.2 卡尔曼滤波 .....                | 175 |
| 8.4.3 贝叶斯推理 .....                | 178 |
| 8.4.4 Dempster-Shafer 算法 .....   | 180 |
| 8.4.5 基于信息论的数据融合 .....           | 185 |
| 8.4.6 基于感知的数据融合 .....            | 188 |
| 8.4.7 智能数据融合 .....               | 190 |
| <b>参考文献</b> .....                | 194 |

# 第 1 章 机器人传感器

机器人传感器是 20 世纪 70 年代开始发展起来的一类专门用于机器人技术方面的新型传感器。机器人传感器和普通传感器工作原理基本相同，但又有其特殊性。

## 1.1 机器人与传感器

### 1.1.1 机器人技术

机器人是指计算机控制的能模拟人的感觉、手工操纵，具有自动行走能力而又足以完成有效工作的装置。机器人技术是一门综合性技术，涉及控制工程、计算机、人工智能、微电子、传感器、新材料、仿生技术等多种学科，是先进制造技术的典型代表。

机器人按照其功能可以划分为三代。第一代为操纵型机器人，是一种进行重复操作的机械，即通常所说的机械手，配合电子存储装置，能记忆重复动作，然而，因未采用传感器，所以没有适应外界环境变化的能力。第二代为自动型机器人，初步具有感觉和反馈控制的能力，能进行识别、选取和判断。第二代机器人采用传感器，使机器人具有了初步的智能，成为第二代机器人的标识。第三代为智能机器人，具有自我学习、自我补偿、自我诊断能力，具备神经网络，“电脑化”是这一代机器人的重要标志。近 20 年来，机器人技术有了很大的发展，特别是工业机器人已经达到产业化水平，智能机器人技术也有了相当的发展。

人类的活动领域不断扩大，机器人应用也从制造领域向非制造领域发展。像海洋开发、宇宙探测、采掘、建筑、医疗、农林业、服务娱乐等行业都提出了自动化和机器人化的要求。与制造业相比，这些行业的工作环境具有非结构化和不确定性的特点，因而对机器人的要求更高，需要机器人具有行走功能、对外感知能力以及局部的自主规划能力等，这是机器人技术的一个重要发展方向。

目前全球范围内的工业机器人，以每年 30% 以上的速度增长，并推动着工业高速发展。机器人技术及相关自动化装备的发展水平和拥有量已成为衡量一个国家工业水平的重要标志。德国机器人学与系统动力学研究所（DLR）的 G. Hirzinger 在 2000 年 IARP 研讨会上指出：“人们希望人工智能能够推动机器人技术快速发展，使机器人更具智能。但他们忽略了一些事情，例如尽管逻辑决策的作用很大，但传感器的感知与反馈是更高级智能行为的真正基础。事实上，工业机器人在很大程度上仍像几年前一样笨”。也就是说，机器人传感器的应用还很不够，面向应用需求的机器人传感技术与开发是先进机器人研究和发展的关键。

从 20 世纪 90 年代开始，机器人研究开始与其他领域和学科交叉，特别是与传感器技术、驱动技术、控制技术、通信技术和计算机技术的交叉，智能机器人的研究无论是从深度还是从广度上，都出现多样化趋势。传感技术的进步，将是机器人智能化的关键和特色，特别是新型传感器的应用、多传感器的信息融合等将成为新一代机器人实现更高级智能行为的基础。

### 1.1.2 机器人传感器技术

一般机器人有类似人脑功能的思维子系统，类似于眼睛、皮肤、耳等功能的感觉子系

统，类似于手脚功能的运动子系统。人脑、手、足、皮肤、眼睛、耳、舌等的功能在机器人中分别对应于判断和控制、把握、行走、触觉、视觉、听觉、味觉等，各种功能之间有着很强的关联性和依赖性，通过传感器使这些功能得以充分发挥。例如机器人装配作业中，一般有决定零件安装位置的距离传感器、检测零件形状的视觉或触觉传感器以及能检测手的把握状态及安装状态的滑觉传感器和力觉传感器。机器人能够根据从这些传感器获取的信息作出判断、控制并进行有效工作。

机器人传感器主要包括机器人视觉、力觉、触觉、接近觉、距离觉、姿态觉、位置觉等传感器。由于机器人视觉研究的重要性和复杂性，一般将机器人视觉单独列为一个学科研究。与大量使用的工业检测传感器相比，机器人传感器对传感信息的种类和智能化处理的要求更高。

经过数年的努力，我国机器人传感技术在原有的相关研究基础近乎空白的情况下，有了长足的进步，研究和发展均取得了可喜的成就。我国机器人智能传感器的主要成就如下。

#### (1) 6 维力/力矩传感器系列

6 维力传感器是机器人最重要的外部传感器之一，它能同时获取 3 维空间的 3 维力和力矩信息，广泛用于力/位置控制、轴孔配合、轮廓跟踪及双机器人协调等机器人控制。20 世纪 80 年代末，西方巴黎经济统筹委员会还对我国和东欧各国禁运该类产品。中国科学院、国家基金委、国家“863”计划等先后多次资助该类项目的研究，取得的研究成果包括：6 维腕力传感器、6 维/多维指力传感器、6 维/多维脚力传感器等，其中中国科学院合肥智能机械所研制的 SAFMS 型系列 6 维腕力/指力传感器已成为国内各智能机器人研究单位的首选，并有少量输出海外。

#### (2) 触觉传感器系列

触觉传感器通过接触方式去感知目标物的表面形貌特征、接触力信息，进而实现目标识别、判别接触位置以及有无滑动的趋势等，是一种与视觉功能互补的感觉功能。我国已研制成功光学阵列触觉传感器、触觉临场感实验系统、多功能类皮肤触觉传感器、主动式触觉实验系统、机器人自动抓握和分类物体系统等，这些成果在利用新技术、新工艺、新方法等方面都取得了突破性进展。

#### (3) 位置/姿态传感器系列

位置/姿态传感器用于对机器人和机器人末端执行器的位置和姿态的判断。我国已成功研制出气流式倾角传感器，液体倾角传感器，激光轴角编码器，超声波、激光、红外测距传感器等，其中气流式倾角传感器已用于机器人姿态控制； $\phi 58\text{mm}$  光学倍频激光轴角编码器，无电细分的原始角分辨率达到每圈 162000 脉冲，将我国机器人位置传感器的制造技术带入世界先进水平行列。

#### (4) 带有力/触觉临场感的机器人装配作业平台

装配作业平台操纵机器人主手，通过远距离的从手完成目标搜索、抓取操作时，有力/触感觉临场感；同时实现了 6 维腕力传感器的动态补偿，使其动态响应小于 5ms；将运动视觉与超声测距相结合用于机器人作业中的工件识别、定位与抓取，使机器人作业能适应非结构化环境和复杂的工艺过程。

### 1.1.3 我国机器人传感器的重点研究方向

根据我国机器人技术发展的需要，力觉及相关传感器将是近期我国机器人传感器研究的重点。

① 水下机器人力觉系统 在高静水压和具有腐蚀性的深海作业，必然对所需的力传感器提出许多苛刻的要求，这将是一个极富挑战性的课题。

② 空间机器人力觉系统 针对空间舱外作业型机器人，目前还没有实用化的力觉系统，主要原因在于传统的应变式力传感器无法适用空间的高真空、高温差、高辐射环境。

③ 柔性力/力矩传感器 这种传感器从传感器反馈方面去实现力/位置混合控制的柔顺运动。

④ 多指灵巧手或多维指力/力矩传感器 这种传感器用于多指灵巧手和传感化的末端执行器融为一体的先进自动化工具。

⑤ 多维加速度传感器 是一种测量多分量惯性力信息的多维力/力矩传感器，其信息可用于机器人运动中的惯性力补偿、重力补偿，甚至直接由加速度反馈控制。

⑥ 以力觉/触觉临场感为特色的虚拟现实 I/O 工具 对恶劣环境下的遥操作机器人、大时延控制的空间机器人具有重要意义，它使操作人员对虚拟环境和远距离环境不仅看得见，而且摸得着。

⑦ 微型多维力/力矩传感器 微机器人研究突破了人类操作能力的尺度极限，将人类带入微米、纳米世界。随着微机器人、微驱动系统研究和应用的进展，对微型多维力/力矩传感器的需求也必然增加。

#### 1.1.4 机器人传感器技术的发展趋势

未来机器人传感技术的研究，除不断改善传感器的精度、可靠性和降低成本等外，随着机器人技术转向微型化、智能化，以及应用领域从工业结构环境拓展至深海、空间和其他人类难以进入的非结构环境，使机器人传感技术的研究与微电子机械系统、虚拟现实技术有更密切的联系。同时，对传感信息的高速处理、多传感器融合和完善的静、动态标定测试技术也将成为机器人传感器研究和发展的关键技术。

随着机器人技术的发展，适应未来机器人的感知系统及相关研究将成为主要研究方向，未来机器人传感器及相关研究包括以下方面。

##### (1) 多智能传感器技术

工业系统向大型、复杂、动态和开放的方向转变使传统的工业系统和机器人技术遇到了严重的挑战，分布式人工智能 (Distributed Artificial Intelligence, DAI) 与多智能体系统 (Multi-Agent System, MAS) 理论为解决这些挑战提供了一种最佳途径。将 DAI 和 MAS 应用于工业和多机器人系统的结果，便产生了一门新兴的机器人技术领域——多智能体机器人系统 (Multi-Agent Robot System, MARS)。在多智能体机器人系统中，最集中和关键的问题表现在其体系结构、相应的协调合作机制以及感知系统的规划和协商等。

##### (2) 网络传感器技术

通信网络技术的发展完全能够将各种机器人传感器连接到计算机网络上，并通过网络对机器人进行有效控制。这种技术包括网络遥操作控制技术、网络化传感器和传感器网络化技术、众多信息组的压缩与扩展方法及传输技术等。

##### (3) 虚拟传感器技术

虚拟传感器是对真实物理传感器的抽象表示，通过虚拟传感器可利用计算机软件仿真各种类型的机器人传感器，实现基于虚拟传感信息的控制操作。机器人虚拟传感器概念的提出并实际应用于机器人的实际控制操作，可望缓解目前由于缺少某些种类的传感器信息，或由于操作环境极端恶劣，目前还没有条件提供在该环境下工作的传感器信息，因此不能实现的

机器人理想操作控制的矛盾。并且，随着虚拟传感器研究的不断深入和功能完善，未来的虚拟传感器可以取代或部分取代某些实际的物理传感器，使机器人感知系统的构成简化、功能增强、成本降低。

(4) 临场感技术

临场感技术以人为中心，通过各种传感器将远地机器人与环境的交互信息（包括视觉、力觉、触觉、听觉等）实时反馈到本地操作者处，生成和远地环境一致的虚拟环境，使操作者产生身临其境的感受，从而实现对机器人带感觉的控制，完成作业任务。临场感的实现不仅可以满足高技术领域发展的急需，如空间探索、海洋开发以及原子能应用等，而且可以广泛地应用于军事领域和民用领域。因此，临场感技术已成为目前机器人传感技术研究的热点之一。

1.2 机器人传感器分类

机器人传感器可分为内部传感器和外部传感器两大类。内部传感器是以机器人本身的坐标轴来确定其位置，安装在机器人自身中，用来感知机器人自己的状态，以调整和控制机器人的行动。内部传感器通常由位置、加速度、速度及压力传感器等组成。

外部传感器用于机器人对周围环境、目标物的状态特征获取信息，使机器人和环境发生交互作用，从而使机器人对环境有自校正和自适应能力。外部传感器通常包括触觉、接近觉、视觉、听觉、嗅觉和味觉等传感器，机器人用外部传感器分类见表 1-1。

表 1-1 机器人用外部传感器分类

| 传 感 器 | 检 测 内 容 | 检 测 器 件        | 应 用        |
|-------|---------|----------------|------------|
| 触觉    | 接触      | 限制开关           | 动作顺序控制     |
|       | 把握力     | 应变计、半导体感压元件    | 把握力控制      |
|       | 荷重      | 弹簧变位测量器        | 张力控制、指压控制  |
|       | 分布压力    | 导电橡胶、感压高分子材料   | 姿势、形状判别    |
|       | 多元力     | 应变计、半导体感压元件    | 装配力控制      |
|       | 力矩      | 压阻元件、马达电流计     | 协调控制       |
|       | 滑动      | 光学旋转检测器、光纤     | 滑动判定、力控制   |
| 接近觉   | 接近      | 光电开关、LED、红外、激光 | 动作顺序控制     |
|       | 间隔      | 光电晶体管、光电二极管    | 障碍物躲避      |
|       | 倾斜      | 电磁线圈、超声波传感器    | 轨迹移动控制、探索  |
| 视觉    | 平面位置    | ITV 摄像机、位置传感器  | 位置决定、控制    |
|       | 距离      | 测距仪            | 移动控制       |
|       | 形状      | 线图像传感器         | 物体识别、判别    |
|       | 缺陷      | 面图像传感器         | 检查、异常检测    |
| 听觉    | 声音      | 麦克风            | 语言控制(人机接口) |
|       | 超声波     | 超声波传感器         | 导航         |
| 嗅觉    | 气体成分    | 气体传感器、射线传感器    | 化学成分探测     |
| 味觉    | 味道      | 离子敏感器、pH 计     | 化学成分探测     |

1.3 内部传感器

1.3.1 位置传感器

(1) 电阻式位置传感器

电阻式位置传感器一般又分为滑线式和绕线式两种。它的核心是一个电位器，电位器中

间抽头为电刷，电刷由细牙螺杆传动。这种传感器的分辨率是由电阻丝的直径和螺杆的螺距决定，要求电阻丝的电阻率要小，即电阻要小，螺杆的螺距要小。对电阻与线径的要求是矛盾的，因此，这种传感器的分辨率较低，线性度也不高。

典型的位置传感器是电位计（称为电位差计或分压计），图 1-1 所示电阻式位置传感器，工作台下面有同电阻接触的触头，当工作台左右移动时接触触头也随之左右移动，从而移动了与电阻接触的位置，通过检测输出电压变化确定以电阻中心为基准位置的移动距离。

假定输入电压为  $E$ ，电阻丝长度为  $L$ ，触头从中心向左端移动  $x$ ，电阻右侧的输出电压为  $e$ 。则根据欧姆定律，移动距离  $x$  为

$$x = \frac{L(2e - E)}{2E} \quad (1-1)$$

把图中的电阻元件弯成圆弧形，可动触头的另一端固定在圆的中心，并像时针那样回转时，由于电阻相应回转角而改变，因此基于上述同样的理论可构成角度传感器。

(2) 光电式位置传感器

利用光电检测元件的光电式位置传感器如图 1-2 所示。图 (a) 为原理示意图，图 (b) 为预先确定的感光量曲线。则光源 (LED) 和感光部分 (光敏晶体管) 间的位移  $x$  可通过检测感光量  $\alpha$  的大小来确定。

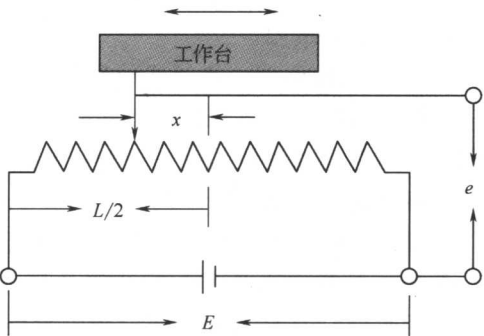


图 1-1 电阻式位置传感器

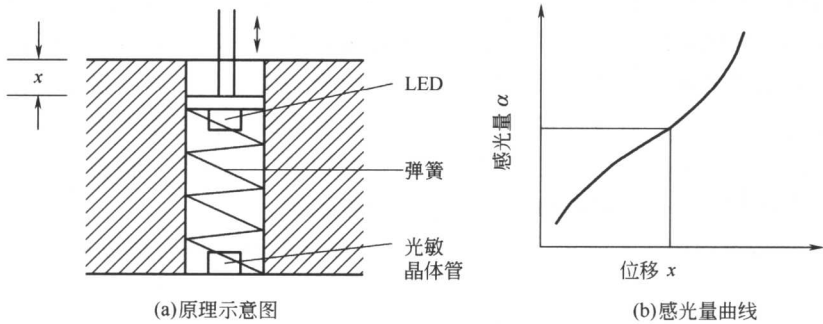


图 1-2 光电式位置传感器

1.3.2 角度传感器

(1) 光电轴角编码器

光电轴角编码器是将圆光栅莫尔条纹和光电转换技术相结合，将机械轴转动的角度量转换成数字电信息量输出的一种现代传感器，作为一种高精度的角度测量设备广泛应用于自动化领域中。根据形成代码的方式不同，光电轴角编码器分为绝对式和增量式两大类。

① 绝对式编码器 具有固定零位，输出代码是轴角的单值函数，抗干扰能力强，断电后再启动工作不用重新标定，无累积误差等优点，但其制造工艺复杂且不易实现小型化。

绝对式光电编码器由光源、码盘和光电敏感元件组成。光学编码器的码盘是在一个基体上采用照相技术和光刻技术制作的透明与不透明的码区，分别代表二进制码“0”和“1”。对高电平“1”，码盘作透明处理，光线可以透射过去，通过光电敏感元件转换为电脉冲；对

低电平“0”，码盘作不透明处理，光电敏感元件接收不到光，为低电平脉冲。光学编码器的性能主要取决于码盘的质量，光电敏感元件可以采用光电二极管、光电晶体管或硅光电池。为了提高输出逻辑电压，还需要接各种电压放大器，而且每个轨道对应的光电敏感元件要接一个电压放大器，电压放大器通常由集成电路高增益差分放大器组成。为了减小光噪声的影响，在光路中要加入透镜和狭缝装置，狭缝不能太窄，且要保证所有轨道的光电敏感元件的敏感区都处于狭缝内。

② 增量式编码器 增量式编码器的码盘刻线间距均等，对应每一个分辨率区间，可输出一个增量脉冲，计数器相对于基准位置（零位）对输出脉冲进行累加计数。正转则加，反转则减。增量式编码器的优点是响应迅速，结构简单，成本低，易于小型化，广泛用于数控机床、机器人、高精度闭环调速系统及小型光电经纬仪中。

码盘、敏感元件和计数电路是增量式编码器的主要元件。增量式光电编码器有三条光栅，A相与B相在码盘上互相错半个区域，在角度上相差 $90^\circ$ 。当码盘以顺时针方向旋转时，A相超前于B相首先导通；当码盘反方向旋转时，A相滞后于B相。采用简单的逻辑电路，就能根据A、B相的输出脉冲相序确定码盘的旋转方向。将A相对应敏感元件的输出脉冲送给计数器，并根据旋转方向使计数器作加法计数或减法计数，可以检测出码盘的转角位置。增量式光电编码器是非接触式的，寿命长、功耗低、耐振动，广泛应用于角度、距离、位置、转速等的检测。

(2) 磁性编码器

磁性编码器是近年发展起来的一种新型编码器，与光学编码器相比，磁性编码器不易受尘埃和结露影响、结构简单紧凑、可高速运转、响应速度快（达 $500\sim 700\text{kHz}$ ）、体积小、成本低。目前高分辨率的磁性编码器分辨率可达每圈数千个脉冲，因此在精密机械磁盘驱动器、机器人等各个领域旋转量（位置、速度、角度等）的检测和控制有着广泛的应用。

磁性编码器由磁鼓和磁传感器磁头构成，高分辨率的磁性编码器的磁鼓是由在铝鼓的外缘涂敷一层磁性材料而成。磁头以前曾采用感应式录音机磁头，而现在多采用各向异性金属磁电阻磁头或巨磁电阻磁头，这种磁头采用光刻等微加工工艺制作，精度高、一致性好、结构简单，并且灵敏度高，其分辨率可与光学编码器相媲美。

磁性编码器结构如图 1-3 所示，磁鼓外层的磁性材料被充磁后形成有一定间距的磁极

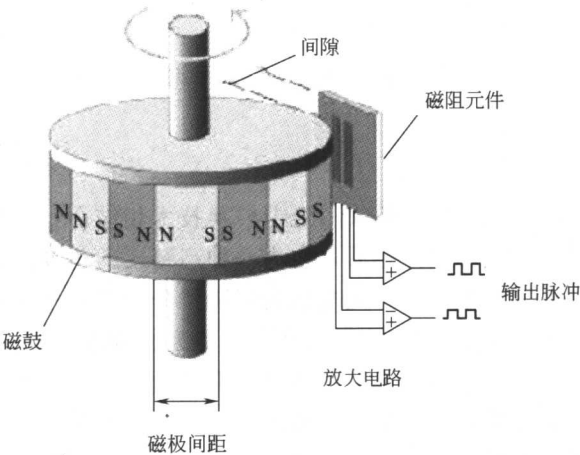


图 1-3 磁性编码器结构

信号，磁极的表露磁场周期性地分布在磁鼓周围。磁鼓旋转时，则检测磁头检测出周期性变化的信号。低分辨率（小于 100）的磁鼓通常是用钹铁硼材料压制成环后充磁而成，其磁化磁极宽度大、表露磁场强，适合于用半导体霍尔元件作检测磁头。高分辨率（几百到数千）的磁鼓由于其磁极宽度非常小，磁性材料的厚度非常薄（小于 1mm），其表露磁场也非常弱，其检测磁头必须用灵敏度更高的各向异性金属磁电阻磁头或巨磁电阻磁头。

## 1.4 触觉传感器

触觉是机器人获取环境信息的一种仅次于视觉的重要知觉形式，是机器人实现与环境直接作用的必需媒介。与视觉不同，触觉本身有很强的敏感能力，可直接测量对象和环境的多种性质特征，因此触觉不仅仅只是视觉的一种补充，触觉的主要任务是为获取对象与环境信息和为完成某种作业任务而对机器人与对象、环境相互作用时的一系列物理特征量进行检测或感知。机器人触觉与视觉一样，基本上是模拟人的感觉。广义上，它包括接触觉、压觉、力觉、滑觉、冷热觉等与接触有关的感觉；狭义上它是机械手与对象接触面上的力感觉。

触觉是接触、冲击、压迫等机械刺激感觉的综合，触觉可以用来进行机器人抓取，利用触觉可进一步感知物体的形状、软硬等物理性质。对机器人触觉的研究，集中于扩展机器人能力所必需的触觉功能，一般把检测感知和外部直接接触而产生的接触觉、压力、触觉及接近觉的传感器称为机器人触觉传感器。

### 1.4.1 柔性触觉传感器

#### （1）柔性薄层触觉传感器

柔性传感器有获取物体表面形状二维信息的潜在能力，是采用柔性聚氨酯甲酸酯泡沫材料的传感器。柔性薄层触觉传感器如图 1-4 所示，泡沫材料用硅橡胶薄层覆盖。这种传感器结构跟物体周围的轮廓相吻合，移去物体时，传感器恢复到最初形状。导电橡胶应变计连到薄层内表面，拉紧或压缩应变计时薄层的形变被记录下来。

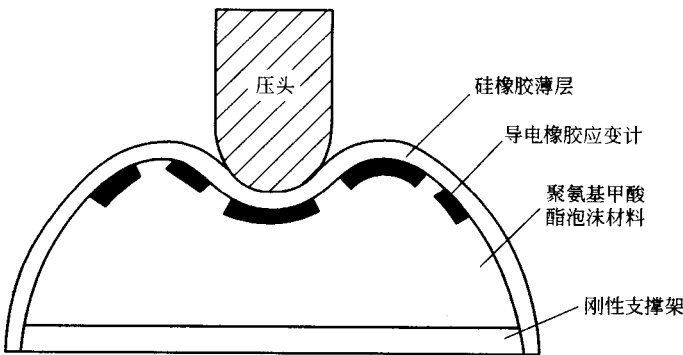


图 1-4 柔性薄层触觉传感器

#### （2）压力感应橡胶

压力感应橡胶是一种具有类似于人类皮肤柔软性的压敏材料，利用压力感应橡胶，可以实现触压分布区中心位置的测定。压力感应橡胶传感器结构如图 1-5 所示，传感器为三层结构，外边两层分别是传导塑料层 A 和 B，中间夹层为压感橡胶层 S，相对的两个边缘装有电极。该结构可看作一个二维放大的电压表，传感器的构成材料是柔软富有弹性的，在大块表