



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



“中国制造2025”
出版工程

机器人力触觉 感知技术

梁桥康 徐菲 王耀南 编著

Robot



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



“中国制造2025”
出版工程

机器人力触觉 感知技术

梁桥康 徐菲 王耀南 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共 11 章, 分别从力触觉感知系统原理、设计方法、分析、建模、研制和应用等方面展开阐述, 对力触觉感知系统的设计和研制、建模方法研究、多维力/力矩信息的智能信息处理模型的建立、高精度标定和解耦方法等内容进行了重点讲解。本书注重实际的力触觉系统的设计和应用, 使读者在了解了机器人力触觉感知技术的基本原理和研究现状的同时, 对力触觉感知系统的实际开发有深入的了解。

本书图文并茂、实际应用性强, 适合机器人技术相关方向的研究者和大专院校师生学习, 也适合智能新技术领域的从业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人力触觉感知技术/梁桥康, 徐菲, 王耀南编著. —北京:
化学工业出版社, 2018. 12

“中国制造 2025” 出版工程

ISBN 978-7-122-33276-9

I. ①机… II. ①梁…②徐…③王… III. ①机器人触觉-研
究 IV. ①TP242. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 258310 号

责任编辑: 宋 辉

文字编辑: 徐卿华

责任校对: 王 静

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号) 邮政编码 100011

印 装: 三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 333 千字 2019 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷



购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

—— 爱因斯坦



“中国制造2025”
出版工程

《“中国制造 2025”出版工程》

编委会

主任

孙优贤（院士）

副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

委员（按姓氏笔画排序）

马正先 王大珩 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔非 任春年 伊廷锋 刘敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李莉 李慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴飞 吴澄 吴伟国 宋浩 张平

张晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈为

陈刚 陈纯 陈杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺威 桂卫华 柴毅 钱锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢颖 谢胜利 蔡登 管晓宏 魏青松

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘云鹤

前言

操控智能化是机器人技术领域研究和发展的主要趋势之一，而系统的感知和反馈是高级智能行为的必要手段。力触觉感知系统能获取机器人作业时与外界环境之间的相互作用力，进而实现机器人的力觉、触觉和滑觉等信息的感知。

本书在作者所在的机器人感知技术团队的多项国家和省部级科研课题（NSFC. 6167316, Hunan NSFC. 2016JJ3045, IRT 2018003）成果的基础上，详细介绍机器人的力触觉感知系统。本书共 11 章，分别从力触觉感知系统原理、设计方法、分析、建模、研制和应用展开阐述。第 1 章为绪论，简单介绍了智能机器人感知技术的发展；第 2 章概括地介绍了机器人力觉和触觉感知技术，包括感知技术的基本原理、常见的分类和研究现状；第 3 章阐述了力敏导电橡胶的基础理论和研究现状，对其导电性和导电机理进行了初步探讨，分析了导电橡胶的力敏特性，并介绍了力敏导电橡胶在触觉传感器及其他领域中的应用；第 4 章对基于力敏导电橡胶触觉感知系统设计方法展开了论述，并通过三种具有整体多层结构的多维触觉传感器详细介绍了触觉感知系统设计方法，传感器的受力分析模型的建立方法，并通过相应的指标描述了设计的三种结构的优缺点；第 5 章在第 4 章的基础上，设计了一种基于力敏导电橡胶的可整体液体成型的两层非对称式网状传感器敏感单元结构，其兼有柔韧性和检测三维力的能力，基于导电橡胶材料的隧道效应计算模型对传感器的物理模型进行了改进，建立了更加符合橡胶材料实际性质的三维力检测模型；第 6 章对柔性三维触觉传感器的标定方法进行了研究，并设计了基于 BP 神经网络的触觉传感器标定方法；第 7 章介绍了常见的电阻式、电容式、光电式和压电式多维力/力矩传感器的检测原理，并通过指尖四维力/力矩传感器的设计阐述了力觉感知系统的设计方法和步骤；第 8 章介绍了常见的多维力觉感知系统的标定和解耦算法，通过实例分析了各种解耦算法的性能；第 9~11 章分别通过基于力觉感知的三维坐标测量系统、仿人机器人足部多维力/力矩传感器的设计与研究、水下机器人腕部

六维力/力矩信息获取等介绍了力觉感知系统的应用。

本书由湖南大学王耀南（第1章和第2章）、昆明船舶设备研究试验中心徐菲（第3~6章）、湖南大学梁桥康（第7~11章）编著。全书由梁桥康负责统稿和审校。中国科学院合肥物质科学研究院研究员葛运建为本书的编写提供了很多的指导和帮助。此外，湖南大学伍万能、龙建勇等为本书相关章节的标定和解耦实验做了大量工作。

本书适合机器人技术相关方向的研究者和学生阅读和参考，也适合智能新技术领域的从业人员参考学习。作者希望通过本书的介绍，吸引更多的有志青年选择智能机器人感知系统作为自己的研究方向，从事机器人感知、人机交互和人工智能等相关的职业，并积极加入机器人技术、仿生感知与新型传感器、信号获取与处理、人工智能及其应用领域的研究队伍。

限于作者水平，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

说明：为了方便读者学习，书中部分图片提供电子版（提供电子版的图，在图上有“电子版”标识），在 www.cip.com.cn/资源下载/配书资源 中查找书名或者书号即可下载。

目录

1 第1章 绪论

- 1.1 概述 / 2
- 1.2 智能机器人感知技术的发展 / 4
- 1.3 智能机器人信息获取概述 / 7
- 参考文献 / 8

10 第2章 智能机器人感知系统

- 2.1 概述 / 11
- 2.2 智能机器人多维力/力矩信息感知获取 / 15
 - 2.2.1 智能机器人多维力/力矩传感器研究现状 / 15
 - 2.2.2 智能机器人多维力/力矩传感器的分类 / 19
 - 2.2.3 电阻式多维力/力矩传感器检测原理 / 19
 - 2.2.4 智能机器人多维力/力矩传感器的发展 / 20
- 2.3 智能机器人触觉感知技术 / 23
 - 2.3.1 压电式触觉传感器 / 23
 - 2.3.2 压阻式触觉传感器 / 25
 - 2.3.3 电容式触觉传感器 / 26
 - 2.3.4 其他触觉传感器 / 28
 - 2.3.5 触觉传感器的应用 / 30
 - 2.3.6 触觉传感器的发展趋势 / 33
 - 2.3.7 存在问题 / 40
- 参考文献 / 40

44 第3章 力敏导电橡胶的理论基础

- 3.1 概述 / 45
- 3.2 导电橡胶的导电性 / 46
 - 3.2.1 基础理论 / 46
 - 3.2.2 导电机理 / 47
- 3.3 导电橡胶的力敏特性 / 49
 - 3.3.1 压敏特性 / 50
 - 3.3.2 外力-电阻计算模型 / 51
- 3.4 力敏导电橡胶的应用 / 56
 - 3.4.1 力敏导电橡胶的特色应用 / 56

- 3.4.2 力敏导电橡胶在触觉传感器中的应用 / 57
- 参考文献 / 60

62

第4章 柔性三维触觉传感器的结构研究

- 4.1 概述 / 63
- 4.2 整体三层式结构 / 65
 - 4.2.1 阵列结构及力学模型 / 65
 - 4.2.2 局限性分析 / 68
- 4.3 整体两层式结构 / 69
 - 4.3.1 阵列结构及力学模型 / 69
 - 4.3.2 局限性分析 / 74
- 4.4 改进型两层式结构 / 74
 - 4.4.1 阵列结构及力学模型 / 74
 - 4.4.2 仿真实验 / 80
 - 4.4.3 局限性分析 / 82
- 参考文献 / 83

84

第5章 整体两层网状式结构的柔性三维触觉传感器研究

- 5.1 概述 / 85
- 5.2 整体两层对称式网状结构的传感器研究 / 85
 - 5.2.1 阵列结构 / 85
 - 5.2.2 行列扫描电路 / 87
 - 5.2.3 传感器的解耦 / 89
- 5.3 整体两层非对称式网状结构的传感器研究 / 100
 - 5.3.1 阵列结构 / 100
 - 5.3.2 单点受力模型 / 101
 - 5.3.3 多点受力模型 / 103
 - 5.3.4 解耦实验 / 105
- 5.4 基于隧道效应模型的传感器研究 / 116
 - 5.4.1 敏感单元的制作流程 / 118
 - 5.4.2 受力分析 / 120
 - 5.4.3 解耦方法探讨 / 124
- 参考文献 / 125

126

第6章 柔性三维触觉传感器的标定研究

- 6.1 概述 / 127
- 6.2 标定平台的设计 / 128
- 6.3 标定实验 / 130
- 6.4 基于BP神经网络的柔性三维触觉传感器标定 / 134

- 6.4.1 BP 神经网络 / 134
- 6.4.2 利用 BP 神经网络实现传感器标定 / 136
- 参考文献 / 143

144

第 7 章 机器人力觉信息获取的研究

- 7.1 电阻式多维力/力矩传感器检测原理 / 145
- 7.2 电容式多维力/力矩传感器检测原理 / 149
- 7.3 压电式多维力/力矩传感器检测原理 / 151
- 7.4 光纤光栅式多维力/力矩传感器检测原理 / 155
- 7.5 力觉传感器性能评价指标 / 156
- 7.6 机器人微型指尖少维力/力矩信息获取的研究 / 157
 - 7.6.1 四维指尖力/力矩传感器结构 / 157
 - 7.6.2 五维力/力矩传感器结构 / 160
 - 7.6.3 静、动力学仿真及分析 / 162
 - 7.6.4 应变片布片及组桥 / 173
 - 7.6.5 标定及校准实验设计与维间解耦 / 177
 - 7.6.6 传感器精度性能评价 / 179
 - 7.6.7 机器人微型四维指尖力/力矩信息获取实例 / 181
- 参考文献 / 184

185

第 8 章 机器人多维力/力矩传感器解耦方法的研究

- 8.1 静态线性解耦 / 187
 - 8.1.1 直接求逆法 ($n=6$) / 187
 - 8.1.2 最小二乘法 ($n>6$) / 187
- 8.2 静态非线性解耦 / 188
 - 8.2.1 基于 BP 神经网络的多维力/力矩传感器解耦 / 188
 - 8.2.2 基于支持向量机 SVR 的多维力/力矩传感器解耦 / 189
 - 8.2.3 基于极限学习机的多维力/力矩传感器解耦 / 192
 - 8.2.4 稀疏电压耦合贡献的极限学习机解耦 (MIVSV-ELM) / 195
- 8.3 实验 / 197
 - 8.3.1 标定实验 / 197
 - 8.3.2 解耦实验 / 199
 - 8.3.3 BP、SVR 及 ELM 三种非线性解耦算法的对比分析 / 204
- 参考文献 / 205

206

第 9 章 基于力觉感知的三维坐标测量系统

- 9.1 接触式三维坐标测量和补偿原理 / 208
 - 9.1.1 基于五维力/力矩传感器的三维坐标测量原理 / 208

- 9.1.2 三维坐标测量弹性变形补偿 / 208
- 9.1.3 三维坐标测量综合不确定度 / 209
- 9.2 基于五维力/力矩传感器的探测头系统设计 / 210
 - 9.2.1 集成式五维力/力矩传感器的设计 / 210
 - 9.2.2 仿真驱动的集成式五维力/力矩传感器的设计 / 211
- 9.3 五维力/力矩传感器的研制 / 213
- 9.4 五维力/力矩传感器的标定 / 216
- 参考文献 / 218

219 第10章 仿人机器人足部多维力/力矩传感器的设计与研究

- 10.1 概述 / 220
- 10.2 基于 Stewart 的六维力/力矩传感器概述 / 221
 - 10.2.1 Stewart 并联机构简介 / 221
 - 10.2.2 基于 Stewart 并联机构的六维力传感器概述 / 222
- 10.3 仿人机器人新型足部设计及六维力/力矩消息获取实现 / 226
 - 10.3.1 仿人机器人足部概述 / 226
 - 10.3.2 基于并联机构的新型足部机构设计 / 226
 - 10.3.3 运动学分析 / 228
 - 10.3.4 刚度分析 / 231
 - 10.3.5 足部力/力矩信息获取 / 233
- 10.4 基于柔性并联机构的六维力/力矩传感器 / 238
 - 10.4.1 新型关节设计 / 238
 - 10.4.2 基于柔性并联机构的六维力/力矩传感器结构 / 240
- 参考文献 / 241

243 第11章 水下机器人腕部六维力/力矩信息获取

- 11.1 概述 / 244
- 11.2 水下特殊环境下的力感知关键技术 / 244
- 11.3 水下机器人腕部六维力/力矩传感器设计 / 245
 - 11.3.1 系统构造及检测原理 / 245
 - 11.3.2 传感器静态力学分析 / 247
 - 11.3.3 传感器布片及组桥 / 252
 - 11.3.4 传感器精度性能评价 / 255
- 11.4 水下六维力/力矩传感器扩展: 超薄六维力/力矩传感器 / 257
- 11.5 水下机器人腕部六维力/力矩信息获取应用实例 / 261
- 参考文献 / 262

263 附录 多维力传感器解耦算法代码



第1章

绪论

1.1 概述

随着机器人技术的进步和制造业的大规模高速扩展,机器人开始广泛应用于汽车、电子、机械等行业,主要从事焊接、装配、产品质量检测、搬运、加工、码垛等高强度重复作业,随着制造业竞争的日益加剧,引入柔性化、绿色化、数字化的智能制造是制造业发展的必然方向。机器人作为未来制造业的核心装备,传统固定模式和单任务工业机器人显然无法满足智能化制造需求,迫切需要引入智能感知、信息获取和控制技术,以完成更加复杂和自动化水平要求更高的作业处理,逐步替代人工完成复杂工序和精密作业处理。如在汽车、机床等行业的装配和抓取环节,希望机器人能够自动完成智能化装配和抓取处理;在精密制造生产线中,涉及各种各样的高速、高精度产品装配和分拣,迫切需要具有高速、高精度的高可靠机器人自动化装备。

目前国内外智能机器人研究内容非常广泛,研究方向也十分具体和细化,相应的研究成果很多,具体的关于智能机器人的主要研究内容大概可以概括为以下几个方面。

(1) 机器人执行机构的优化和创新设计技术

探索新的机器人本体执行机构的材料、构型和装配方式,如利用并联机构、柔性机构和混联机构完成特殊的工作任务,利用新的高强度轻质材料提高刚度/自重比,利用模块化设计和可重构等装配方式搭建各种新型的面向任务的机器人。一些高性能材料的不断出现,如形状记忆合金、电致流变流体材料、磁致流变流体材料、电致伸缩材料、磁致伸缩材料、光导纤维和功能凝胶等对机器人技术的不断发展和应用起到了关键性作用,机器人的设计和建造需要高强度、高韧性、变形可控的高性能材料,或者具有特殊强度、韧性以及一些类生物特性的材料。一些集传感、控制、驱动多种功能于一身的智能材料被不断研究出来,考虑如何将这此新型材料用于机器人的结构、驱动和传感将为机器人的性能提高起到关键作用。

(2) 机器人控制技术研究

机器人系统建模与分析、路径规划、运动控制和自主控制等,如通过人工神经网络、模糊控制和遗传算法等高级智能算法使机器人系统在复杂环境中具有高度的适应性和鲁棒性,将极大地提高系统的控制性能。

目前在结构化环境下的控制方法经广泛的研究和应用已取得可喜的成果,但对非结构化、未知环境下的机器人控制关键理论、技术和方法还有待进一步完善。

(3) 机器人-控制者的人机实时交互

机器人集环境感知、动态决策和规划、行为控制与执行等多功能于一体,智能机器人的关键智能技术是自动规划技术和基于传感器的智能。研究机器人微型化、智能化、网络化和信息化的各种传感器及检测感知技术,利用图形/图像分析、图像重构、立体视觉、传感器动态分析和补偿、多传感器信息融合、虚拟现实临场感等技术实现实时的人机交互等是当前的研究热点。可以通过虚拟机器人技术实现基于多传感器、多媒体和虚拟现实以及临场传感技术的机器人虚拟遥控操作和人机交互。

(4) 机器人仿生智能技术研究

通过研究、学习、模仿来复制和再造某些生物系统的结构、功能、工作原理及控制机制,机器人对自然的适应和改造能力将获得了巨大的提高和改善。结构仿生通过研究生物肌体的构造和动作机理,搭建类似生物体或生物体中某部分的机械装置作为机器人的机械本体结构,通过结构相似实现功能仿生,如仿生足部、仿生鱼、蛇形机器人、LS3 野外机器人等。机器人所采用的运动方式主要有轮式、履带式、足式、飞行式、蠕动式、振动冲击式和泳动式等,通过模仿生物系统形式多样的运动器官和运动形式,拓宽机器人在各种环境中(如深海、陆地、空中)的运动功能和性能,实现机器人的仿生运动。通过对生物视觉、听觉、触觉等感知功能的研究,有助于解决机器人更高性能的环境感知问题。如仿生视觉、仿蜜蜂导航和定心能力、仿蝙蝠超声波仿生声呐头、仿生皮肤等。如何应用不断涌现的新型敏感材料和检测方法实现仿生感知在机器人的研究中具有重大意义。

(5) 多传感感知和信息融合

机器人系统复杂,控制方法要求高,系统的未知因素很多,控制变量具有不确定性,因此机器人依赖于其感知系统如视觉、力觉、触觉、接近觉、距离觉、姿态觉、位置觉等传感器,及其采用的相关信息获取、融合、理解及控制方法和机制。关于机器人感知系统的研究还不够成熟,其相应的感知信息方面的技术相对落后,自身在智能化和网络化方面还有待进一步发展。

(6) 多智能体协调控制技术

机器人的具体任务可能需要多个机器人共同协作完成,应主要考虑

多机器人合作和多机器人协调等两个方面的问题。如通过多机器人系统来协调完成飞船与空间站的交会对接,能够有效地避免利用喷气装置对接时极易产生的飞船与空间站之间的碰撞,继而避免可能出现的毁坏的危险。通过对多智能体的群体体系结构、相互间的通信与磋商机理,感知与学习方法,建模和规划、群体行为控制等方面进行研究,通过群体行为增强个体智能,提高系统整体工作效率,减少局部故障对整体的影响,从而表现出“组智能”,实现团体功能。

(7) 故障诊断及可靠性分析

利用基于解析数学模型、基于信号处理和基于知识等故障诊断方法,结合专家系统、神经网络和混合诊断等智能化技术,对机器人进行故障诊断和可靠性评估,设计具有故障容错性能的机器人,以提高机器人的可靠性、降低系统的故障率和故障损失也是当前的研究内容之一。

(8) 特殊极端环境下机器人的感知、机构、控制和驱动研究

极端环境机器人是当今前沿技术研究最活跃的领域之一,国际上把极端环境下的机器人适应技术公认为通往机器人技术产业化之路上必须解决的难题,对其进行深入的研究与开发是推进高精尖的国防军事、航空、航天、航海、资源开发、民用机器人的必需步骤。近年来,世界各国十分重视极端环境下机器人技术的研究,分别研究和开发新型的具有智能、能接受面向任务的命令、自动搜索目标、自动制订规划并完成任务的极端环境下机器人,用以完成极端环境下各种人类不可能完成或较难完成的作业任务。

1.2 智能机器人感知技术的发展

智能机器人最重要的特征之一就是其装备有能够将环境中各种有用信息及时反馈给机器人控制系统的较为齐全的感知系统,并通过多传感器融合技术有效地适应环境的变化。对机器人感知系统的研究和开发,推动了现代工业机器人技术的发展,使得机器人技术在现代工业中得以推广进而降低总体投资成本^[1,2]。

智能机器人技术涉及的传感器种类繁多。目前比较成熟的机器人传感器及检测感知技术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,图形/图像分析、图像重构、立体视觉、传感器动态分析和补偿、多传感器信息融合、人机交互、虚拟现实临场