

国家自然科学基金
国家科委863高技术 资助项目

机器人学

智能机器人传感技术

● 张福学 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

73.051
506

机器人学

智能机器人传感技术

国家自然科学基金
国家科委 863 高技术

资助项目

张福学 编著

电子工业出版社

003 20

内 容 简 介

本书深入系统地论述了各类智能机器人传感器的原理、结构、性能,以及信号处理和应用技术,是我国第一部全面论述智能机器人传感技术的专著。全书共四编,计 27 章。第一编论述机器人触觉,计 14 章,包括动觉、触觉、滑觉、接近觉、热觉,以及信号处理和感知数据融合技术等。第二编论述机器人非触觉,计 8 章,包括温度、距离、线速度和线加速度、力和转矩、角速度和角度,以及姿态传感器。第三编论述机器人语言与听觉,计 3 章,包括机器人语言、听觉器官和人-机接口技术。第四编论述机器人视觉,计 2 章,即图像技术和计算机视觉。

本书可供研究、生产和应用传感器的科技人员参考,适用于从事机器人和自动化研究的工程师和科学家,亦可用作高等院校仪器仪表与测量、自动控制、惯性技术、计算机应用、电子材料与元器件、无线电技术、生物医学等专业的研究生和本科生的教学用书。

机器人学

智能机器人传感技术

张福学 编著

责任编辑 龚兰方

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

电子工业出版社计算机排版室排版

北京市顺义县李史山胶印厂印刷

*

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:15 插页:1 字数:386 千字

1996 年 9 月第一版 1996 年 9 月第 1 次印刷

印数:3000 册 定价:23.80 元

ISBN 7-5053-3186-8/TN·886

00170

前 言

机器人学是一门边缘学科,它涉及电子精密机械、空间机构学、操纵动力学、人机工程学、生物学、控制与惯导系统、传感技术、计算机系统、人工智能和系统工程。由于机器人学的领域十分广泛,因此,虽然近年来国内外出版了许多机器人的书,但很难从一本书中了解机器人的全貌。为了弥补已有著作的不足,作者结合自己的科研教学工作,以“机器人学”命名分别撰写了《智能机器人传感技术》和《机器人集成方法、自动机械设计技巧、机器人应用》两本专著,试图以此对我国正在形成的“机器人热”起到加温作用。

本书是在作者领导的研究所完成多项国家科委和国家自然科学基金委员会“863”高技术项目的基础上,参阅了国内外有代表性的著作,在国家自然科学基金委员会和国家科委“863”机器人传感器实验室支持下完成的。北京信息工程学院肖航撰写了第二十二章中 22.1~22.4 初稿,李擎撰写了第八章中 8.6,陈占先、李邓化和刘献强参与撰写第十九章中 19.12 和第二十二章中 22.5,其中反映了他(她)们的科研成果。电子工业部第二十六研究所刘一声和航天工业部 200 厂李耀宗两位高级工程师提供了国外机器人方面的译文。张欣中和周维真两位教授审阅了第二十六和第二十七章,彭光泉教授审阅了第十九、二十一和二十二章。参与审校的人员有郝建德、胡信裕、欧国银、翟澍龙、段守禄、甘荃、李英伟、刘国安、张星泉、苏中、何召文、王海东、张伟、张磊、王丽坤、李万忠、夏颂、刘健宁、任宏超、吴建义、缪镛、田运志、罗先正和王秀奎等,全书由张福学教授统稿。在本书即将出版之际,对以上各位付出的辛勤劳动,特别是对蒋新松院士给予的指导和具体帮助表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,必有谬误之处,恳请读者批评指正!

张福学

作者简介

张福学(1939—)云南宣威人。1961年云南大学物理系毕业。历任电子工业部四川压电与声光技术研究所副所长、高级工程师。北京信息工程学院传感器电子学研究所所长、教授。四川省委和省政府科技顾问,北京市人民政府专业技术顾问。中国惯性技术学会第一、二、三届理事,中国电子学会和国际电气电子工程师学会(IEEE)高级会员。美国科学促进会会员,美国纽约科学院院士,美国名人传记学会理事会、执行理事会和出版委员会科学顾问。南京航空航天大学兼职教授,电子工业部北京真空电子技术研究所兼职教授、博士研究生导师。全国总工会第九届候补执行委员和第十届执行委员。他首先提出“气体摆”新原理,根据这一原理发明了气体摆式倾角传感器和气体线加速度传感器。以他为首研制成功的压电晶体速率陀螺和压电射流速率传感器等惯性器件,在航空、航天、舰船、兵器和机器人等技术领域广泛应用。对生物压电性进行了深入研究,提出“人体由电偶极子组成,在电场作用下电偶极子转向电场方向并沿电场方向移动,……”的学术观点。根据这一观点发明的电场治疗仪能缩短骨折愈合期的 $1/3\sim 1/2$,治疗陈旧性骨折、骨不连、软组织损伤、颈椎病、肩肘炎、关节炎疗效显著,被誉为“张氏治疗仪”,产品出口到德国、瑞典、印度、意大利、加拿大、新加坡、美国、阿根廷、香港、台湾等国家和地区。先后获国家发明奖和科技进步奖六项,部委级科技进步奖二十项,中、英、美发明专利十项。在国内外34种刊物上发表文章232篇。主要著作十九部书,其中《压电学》(上下册)评选为全国优秀科技图书。培养博士生3人,硕士生13人。1978年全国科学大会授予“全国科技先进工作者”称号,1979年国务院授予“全国劳动模范”称号,1984年国家人

事部授予国家级“中青年有突出贡献专家”称号,1991年获国务院的政府特殊津贴证书。先后被编入《中国科技人物辞典》、《中国工程师名人大全》、《中国人名词典》、《世界科技名人录》和《世界名人录》。

主要著作

1. 《压电晶体陀螺》
2. 《压电晶体力和加速度传感器》
3. 《压电学》(上下册)
4. 《压电铁电应用》
5. 《实用传感器手册》
6. 《传感器电子学及其应用》
7. 《传感器敏感元器件大全》
8. 《传感器电子学》
9. 《可靠性工学》
10. 《传感器实用电路 150 例》
11. 《传感器应用及其电路精选》(上下册)
12. 《英汉传感技术辞典》
13. 《日汉传感技术辞典》
14. 《传感器敏感元器件实用指南》
15. 《机器人学》——智能机器人传感技术

目 录

第一编 机器人触觉	(1)
第一章 机器人触觉概论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 人体触觉敏感	(4)
1.3 传感器和换能器	(10)
第二章 机器人关节部位敏感线位移和角位移的 非光学动觉传感器	(21)
2.1 机器人动觉传感器	(21)
2.2 电阻式电位计	(23)
2.3 电容式电位计	(26)
2.4 自动同步机	(26)
2.5 解析器	(29)
2.6 Motornetics 解析器	(35)
2.7 感应式传感器	(37)
2.8 线性可变差接变压器	(39)
2.9 气压传感器	(41)
2.10 机械传感器	(46)
第三章 机器人关节部位敏感线位移和角位移的 光学动觉传感器	(47)
3.1 光学断续器	(47)
3.2 光学编码器	(49)
3.3 光学增量型编码器校准机器人	(62)
3.4 增量型编码器导致的不稳定性	(65)
第四章 触觉传感器	(68)
4.1 力、压力和剪切力	(68)

4.2	触觉传感器开关	(69)
4.3	压阻	(73)
4.4	压电聚合物	(78)
4.5	光学	(81)
4.6	磁	(91)
4.7	超声	(95)
4.8	电容	(96)
4.9	电化学传感器	(97)
4.10	典型触觉传感器	(98)
第五章	柔性触觉传感器	(101)
5.1	柔性对触觉传感器获取信息的影响	(101)
5.2	获取三维表面信息的触觉传感器设计	(102)
第六章	接近觉传感器	(112)
6.1	生物触须	(112)
6.2	工程触须	(113)
6.3	接触接近觉传感器	(118)
6.4	非接触接近觉传感器	(119)
6.5	机器人弧焊传感器	(133)
第七章	滑觉传感器	(138)
7.1	受迫振荡滑觉传感器	(139)
7.2	断续器型滑觉传感器	(140)
7.3	滑觉敏感“指”	(141)
7.4	贝尔格莱德手掌滑觉传感器	(142)
第八章	热觉传感器	(145)
8.1	热觉传感器的设计	(145)
8.2	热觉传感器的数学模型	(146)
8.3	热觉传感器识别物体的热扩散率和热传导率	(148)
8.4	热觉传感器分类材料	(149)
8.5	阵列式热觉传感器	(152)
8.6	水下热觉传感器	(152)
第九章	其他模式的触觉敏感	(157)

9.1	纹理传感器	(157)
9.2	电导率传感器	(158)
9.3	通过耦合振动敏感接触	(159)
第十章	触觉和机动性	(161)
10.1	用于抓握的机器人手	(161)
10.2	机器人手指数的确定	(162)
10.3	人手	(163)
10.4	灵巧机器人手和抓爪	(164)
10.5	斯坦福灵巧手	(165)
10.6	Utah-MIT 灵巧手	(167)
10.7	Monash 灵巧抓爪	(168)
第十一章	在反射能级的触觉反馈	(171)
11.1	被动机械柔性	(172)
11.2	主动柔性控制	(173)
11.3	通过跟踪面积图像中心和最小惯性矩的轴检测滑动	(176)
第十二章	触觉数据的模式识别	(180)
12.1	样本匹配	(180)
12.2	匹配二维轮廓	(181)
12.3	用稀少数据识别物体	(184)
12.4	二进制触觉图像的分类	(187)
12.5	视觉视场与触觉视场	(188)
第十三章	主动触觉敏感	(190)
13.1	触觉性能的测量	(190)
13.2	触觉特征	(196)
13.3	识别物体的方法	(198)
13.4	触觉敏感的特性	(199)
第十四章	多路信息源的感知数据融合技术	(201)
14.1	选择传感器	(201)
14.2	融合多路传感器数据	(203)
14.3	多路传感器融合技术的重要性	(205)
第二编	机器人非触觉	(208)

第十五章 温度传感器	(208)
15.1 电现象型温度传感器	(208)
15.2 热膨胀现象型温度传感器.....	(209)
15.3 光现象型温度传感器	(210)
第十六章 检测物体有无的传感器	(212)
16.1 检测物体有无的传感器用途	(212)
16.2 检测物体有无的光传感器.....	(213)
16.3 检测物体有无的气压传感器	(213)
16.4 检测物体有无的机电传感器	(214)
第十七章 距离传感技术	(216)
17.1 利用三角测量方法的距离传感技术	(216)
17.2 利用结构光方法的距离传感器技术	(217)
17.3 渡越时间距离探测器	(220)
第十八章 速度和流速传感器	(224)
18.1 直流转速表	(224)
18.2 用光学编码器测量速度	(226)
18.3 流速传感器	(228)
第十九章 线加速度传感器	(232)
19.1 线加速度传感器的原理	(232)
19.2 线位移式加速度传感器	(233)
19.3 摆锤式加速度传感器	(237)
19.4 液体摆式加速度传感器	(241)
19.5 金属挠性加速度传感器	(242)
19.6 石英挠性加速度传感器	(243)
19.7 压阻式加速度传感器	(246)
19.8 压电式加速度传感器	(252)
19.9 光测弹性效应激光加速度传感器	(253)
19.10 光纤加速度传感器	(254)
19.11 振弦式加速度传感器	(256)
19.12 气流式线性加速度传感器	(257)
第二十章 力和转矩传感器	(261)

20.1	通过监控电动机电流感知力	(261)
20.2	应变计力敏传感器	(262)
20.3	电位计式力敏传感器	(268)
20.4	膜片式压力传感器	(269)
20.5	电感式压力传感器	(269)
20.6	电容式压力传感器	(270)
20.7	力平衡式压力传感器	(270)
20.8	电感式转矩传感器	(271)
20.9	腕力传感器	(272)
20.10	柔性和装配操作	(275)
第二十一章 陀螺		(280)
21.1	框架式陀螺	(280)
21.2	挠性陀螺	(283)
21.3	动力调谐式挠性陀螺	(284)
21.4	静电陀螺	(286)
21.5	激光陀螺	(289)
21.6	光纤陀螺	(294)
21.7	振梁式压电陀螺	(297)
21.8	压电射流陀螺	(301)
21.9	半球谐振式陀螺	(307)
21.10	微机械振动陀螺	(309)
第二十二章 姿态传感器		(311)
22.1	惯性系统	(311)
22.2	捷联式系统的基本方程	(315)
22.3	机器人姿态传感器	(320)
22.4	姿态传感器的构成	(337)
22.5	气流式水平姿态传感器	(342)
第三编 机器人语言与听觉		(350)
第二十三章 机器人语言		(351)
23.1	语音应答装置	(351)
23.2	工作的程序化	(352)

23.3	机器人语言的分类	(353)
23.4	VAL 语言	(354)
23.5	AL 语言	(361)
第二十四章 机器人的听觉器官		(375)
24.1	人和机器人听觉器官的类比	(375)
24.2	传感器	(377)
24.3	拾音器	(384)
24.4	送话器	(386)
24.5	扬声器	(388)
24.6	耳机	(391)
第二十五章 人机接口技术		(394)
25.1	给机器人的指令方式	(394)
25.2	机器人的工作环境示教系统	(395)
25.3	语音识别技术	(396)
25.4	自然语言系统	(402)
第四编 机器人视觉		(407)
第二十六章 图像技术		(407)
26.1	点式图像传感器	(407)
26.2	线列式图像传感器	(409)
26.3	平面传感器	(410)
26.4	立体传感器	(417)
26.5	图像显示	(418)
26.6	硬件	(421)
26.7	图像编码	(423)
第二十七章 计算机视觉		(431)
27.1	物体识别和分类	(431)
27.2	软件设计	(445)
27.3	视觉训练和适应的需要	(446)
27.4	工业视觉系统	(446)
27.5	早期机器人视觉系统的实例	(448)
参考文献		(464)

第一编

机器人触觉

第一章 机器人触觉概论

1.1 概述^[1~21]

1.1.1 工业机器人需要反馈传感器

当今工业机器人无感知能力的居多。这些机器人的操作程序都是预先制定，并按照预定程序重复无误地完成确定的任务。它们缺乏适应性，只有当涉及的对象相同时，才能产生一致的结果。但是，通过预先制定的各种操作程序，可完成一系列任务。预先制定的程序包括喷漆、弧焊、造粒、机器维护、点焊、粘结、切割和组装等。

然而，许多机器人的应用需要感知，根据感知的信息改进计算机控制。利用这种感知的信息可做到：

(1) 随机安置物体的位置，从而降低购置固定夹具和夹紧装置所需的高额费用；

(2) 允许改变物体的形状。一个物体只需要制成预定用途要求的精度，而不必制成符合自动化装配需求的高精度，也不需要高价地制造 0.1mm 精度的载体。机器人可通过计算法定位用螺

栓栓住物体。例如，桔子和蛋等食品，其形状和尺寸是变动的，通过触觉传感器感知的信息，机器人可抓住它；

(3) 防止发生意外事故。例如，自动导向的车辆(AGV)式机器人，在道路上不能撞到人；

(4) 在错误条件下有智能功能。例如，一个螺母不能跟螺丝啮合，在装配前设法更换另外的螺母；

(5) 控制质量。机器人传感器能监控所操纵工件的质量，例如，检查出有毛病的工件。

除听觉、味觉和嗅觉外，感知形式可分成接触传感器和非接触传感器。

1.1.2 接触和非接触传感器的对比

非接触传感器检测机器人周围的声波、光和其他电磁波，以及电、磁和静电场之间的互作用。

视觉是人类最重要的感觉，在机器人敏感技术领域，主要研究计算机视觉。视觉系统在敏感技术中最复杂，它在工业中有相当广泛的应用。

包括人类在内的许多动物能很好地利用触觉信息，他们通过跟外部物体的物理接触获得信息。触觉敏感不受眼力、外部光照、物体的材料组成或表面抛光等影响。人类利用触觉信息保持人体姿态、感知危险警告，以及监控步行和抓握物体。许多无脊椎动物和夜间觅食动物都有高度发达的触觉敏感能力，所以它们能捕食需要的动物和避开危险。显然，机器人也可通过触觉提高自身功能。

触觉敏感有不同定义，R. Andrew Russell 将触觉敏感定义为“传感器和外部物体之间有物理接触的敏感”^[1]。

1.1.3 机器人触觉传感器的应用

许多从事操作和装配任务的机器人，它们通过触觉敏感信息

均可提高自身功能。举起一个物体时，通过触觉敏感可及时检测开始时发生的滑动，以便采取正确的操作。移动中的几个物体处于极度接近时，+1mm 和 -1mm 间隙间的差别很难由视觉察觉，若采用合成力的方法进行监控，便可立即观察出这种差别。在视觉不起作用的有限空间，例如，装有硬币、钥匙、梳子和手绢的口袋中，要想从中找出硬币，通过触觉敏感便能探测和辨别出来。辨别物体的方法是通过触觉确定物体的性能，这些性能包括：(1)重量；(2)温度；(3)制作物体用材料的热性能；(4)可塑性、回弹性和物体表面的摩擦系数；(5)电导率；(6)表面纹理。其他诸如位置、方向、尺寸和表面形状等性能可通过视觉或触觉检测。触觉敏感亦可提供机器人手(或抓手)跟被操纵物体间有关力和转矩等信息。

1.1.4 触觉敏感的内容

机器人和生物的触觉敏感需要功能相互联系的复杂蹊，故机器人必须考虑几者之间的互作用。人们希望设计“类皮肤”的触觉传感器，实际上，这种触觉传感器几乎无用。为了获取信息，触觉传感器应包含：(1)提供使传感器跟待检测物体接触的手段；(2)通过附加额外传感器确定触觉传感器的位置和取向；(3)实现获取和解释触觉信息的“智能”功能。因此，触觉敏感应考虑手爪、致动器、换能器、信息处理，以及触及人体、动物和机器的感觉。

当代机器人、远距离操作和人造器官的触觉敏感的发展水平远远落后于科学幻想影片中描绘的图像。因此，在识别物体和控制操作中，改进换能器，分析各种换能器的输出，以及使用获得的信息等方面，还需要进行大量的基础研究。

机器人若要走出组织有序的工厂，并在组织无序的环境中活动，它需要触觉、导航、操纵物体、自身保护和保护环境等信息。

1.2 人体触觉敏感

人的手有易抓住物体、操纵物体和确定物体的许多物理特性。这些功能都是通过感觉特别是触觉获得的信息来实现，如图 1.1 所示。

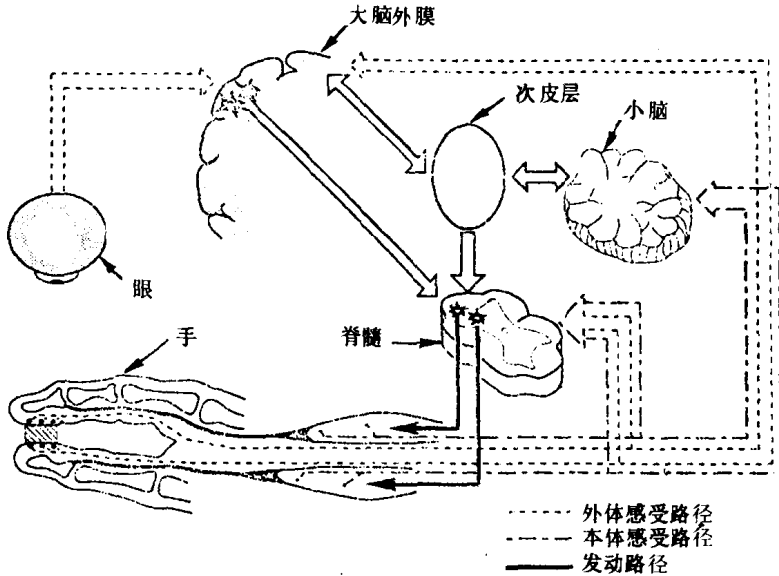


图 1.1 抓握和操作的感觉得控制

被抓物体跟手接触的部位及其性质通过皮肤上的传感器获得。手指的位置及其给物体施加的力，可通过肌肉中的神经末梢、筋和周围的软组织检测。在低级水平，脊髓通过感觉信息完成手的回复控制。这种回复能防止肌肉不自觉地伸展，故可帮助保持手的姿态。在高级水平，小脑、次皮层、大脑外膜逐渐进行极复杂的控制。大脑外膜能将复杂操作的漫长工作组织起来，亦可通过视觉增加触觉敏感功能。

在机器人触觉敏感中，我们试图仿效人体触觉敏感系统的某

些功能。为此，要求掌握人体触觉敏感及其功能的知识，但是，不可能短期内重现生物传感器的功能。可喜的是生物系统的存在和人自身的触觉经验有助于发展机器人触觉敏感。

人体有两种感觉系统能与外部物体接触而产生反应：(1) 内体感觉系统。该系统检测诸如手足关节角、肌肉扩张和肌肉拉紧等内部参量。机器人通过这些参量间接地与外部物体接触；(2) 外体感觉系统。该系统由于皮肤表面温度和形状的改变而产生反应，这些参量是直接接触外部物体的结果。

1.2.1 内体感觉传感器系统

传感器深入人体内部，即可检测人体动作。该系统能动态敏感肌肉、筋和关节的活动，检测结果告诉我们手足的位置和手足加给外部物体的力的大小。

四类传感器有动觉敏感功能，其中两类在肌肉纺锤体中。环螺旋状梢和花枝状梢响应肌肉纤维的被动伸展，如图 1.2 所示。这些神经末梢适应慢，有助于保持人体姿态。

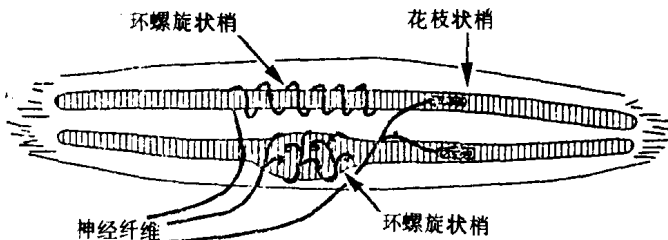


图 1.2 神经肌肉纺锤形体

肌肉拉紧通过肌肉腱中第三类神经末梢敏感，如图 1.3 所示。这种神经末梢响应肌肉拉紧。肌肉拉紧或者通过外力被动地产生，或者通过肌肉本身主动地产生。

第四类神经末梢在关节周围连续的软组织中，它可检测四肢关节移动的小角度。例如，它可以在 2s 内分辨出肩关节处约 0.5° 的位移量。