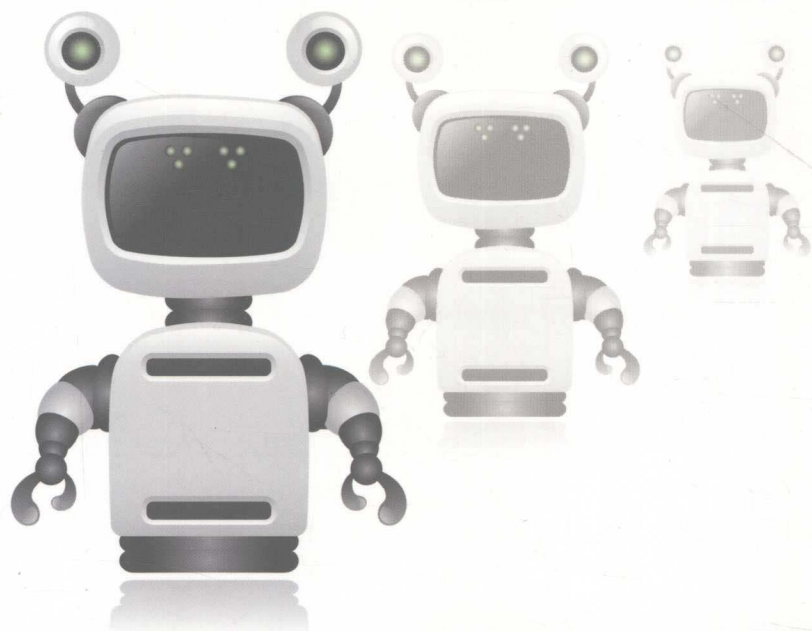


Visual Measurement and Control for Robots



机器人 (第3版) 视觉测量与控制

■ 徐 德 谭 民 李 原 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机器人视觉测量与控制

(第3版)

徐 德 谭 民 李 原 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

机器人视觉测量与控制 / 徐德, 谭民, 李原编著. —3 版.
—北京: 国防工业出版社, 2016. 1
ISBN 978 - 7 - 118 - 10210 - 9

I. ①机... II. ①徐...②谭...③李... III. ①机器人
视觉 - 测量②机器人视觉 - 控制 IV. ①TP242. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234083 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 12½ 字数 362 千字

2016 年 1 月第 3 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

第 3 版说明

本次再版,是在作者研究组取得的新的研究成果的基础上完成的。第 3 章增加了 3.2.2 小节“平面内目标的测量”和 3.6 节“基于目标模型的测量”,改写了 3.11 节“MEMS 装配中的显微视觉测量”。第 4 章增加了 4.8 节“基于视觉测量信息的智能控制”。第 5 章增加了 5.4.3 小节“焊接初始点定位”和 5.7.5 小节“基于球拍位姿的乒乓球旋转估计”,增加了 5.8 节“大口径光栅拼接”。此外,为了方便读者,增加了附录“摄像机标定工具箱与标定函数”,介绍摄像机标定的 Matlab 工具箱和 OpenCV 函数。

本书的修订再版得到了国防工业出版社的大力支持,作者在此表示衷心的感谢。本书的部分修订内容,采用了作者所在研究组的近期研究成果,特别感谢与作者共同研究并对这些研究成果做出贡献的研究人员。

感谢读者对本书的厚爱,感谢读者针对第 1 版和第 2 版提出的宝贵意见与建议。对本书中存在的错误与不当之处,敬请读者进一步批评指正。

第1版前言

视觉测量与控制在机器人领域占有重要地位,受到机器人领域研究人员的普遍重视。视觉对于机器人,就像明亮的双眸对人一样重要。在工业机器人领域,视觉主要用于目标和机器人末端位姿测量以及对机器人末端位姿的控制,其典型应用包括在焊接、喷涂、装配、搬运等作业中对工件的视觉测量与定位。在移动机器人领域,视觉主要用于对环境中目标位姿的测量,其典型应用包括机器人视觉定位、目标跟踪、视觉避障等。在军事领域,视觉可用于无人飞行器对目标的测量与跟踪,其典型应用包括导弹接近目标区域后针对最终目标的导航以及无人战机的视觉定位与跟踪等。在航天与空间探索领域,视觉是太空机器人自主作业不可或缺的重要感知系统,其典型应用包括空间机器人视觉引导下的自主作业和星球探索机器人视觉引导下的自主行走等。因此,研究实时视觉测量与控制,对于提高机器人的自主作业能力、拓展机器人的应用范围具有十分重要的意义。

机器人视觉测量与控制涉及光学、电子学、控制科学、计算机科学等众多学科,是一门重要的综合性前沿学科。机器人的视觉测量与控制,与机器视觉、计算机视觉关系密切,但又具有明显的不同。机器视觉和计算机视觉侧重于对目标的精确测量,致力于从二维图像信息恢复三维信息,即三维重建。机器人的视觉测量与控制,注重实时性和自主工作能力,侧重于控制效果,而对三维重建则不是很重视。此外,目前的视觉测量依赖于摄像机参数,其灵活性和自适应能力较低。为此,近年来国际上机器人领域的很多学者致力于无标定视觉伺服研究,以提高视觉测量与控制的灵活性和自适应能力。

本书是作者在多年从事机器人视觉测量与控制研究的基础上,总

结所取得的研究成果,并结合当前国际国内机器人视觉方面的最新进展,撰写完成的。全书由5章构成,分别为绪论、摄像机与视觉系统标定、视觉测量、视觉控制、应用实例。本书从测量与控制角度,以能够进行工程实现为目标,以机器人的视觉控制为背景,系统全面地介绍了视觉系统的构成和标定、视觉测量的原理与方法、视觉控制的原理与实现,并给出了机器人视觉测量与控制的应用实例。在反映本领域研究前沿的基础上,注重可实现性是本书的一个重要特点。

本书部分研究工作得到了国家“973”计划(2002CB312204)、“863”计划(2006AA04Z213)和国家自然科学基金(60672039)的资助,作者在此表示诚挚的感谢。本书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助和国防工业出版社的大力支持和帮助,作者在此表示衷心的感谢。本书的部分内容,采用了作者所在研究组的研究成果,特别感谢与作者共同研究并对这些研究成果做出贡献的研究人员。

近年来,机器人视觉测量与控制方面的研究发展迅速,特别是机器人视觉控制方面的研究不断取得新的进展。作者虽然力图在本书中能够体现机器人控制的主要进展,但由于机器人视觉控制一直处于不断发展之中,再加上作者水平所限,难以全面、完整地将当前的研究前沿和热点问题一一探讨。书中存在错误与不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2007年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人视觉控制	1
1.1.1 机器人视觉的基本概念	1
1.1.2 机器人视觉控制的作用	3
1.2 机器人视觉控制的研究内容	4
1.2.1 摄像机标定	4
1.2.2 视觉测量	5
1.2.3 视觉控制的结构与算法	6
1.3 机器人视觉系统的分类	6
1.3.1 根据摄像机与机器人的相互位置分类	7
1.3.2 根据摄像机数目分类	8
1.3.3 根据是否自然测量分类	8
1.3.4 根据控制模型分类	9
1.4 视觉控制的发展现状与趋势	10
1.4.1 视觉系统标定研究进展	10
1.4.2 机器人的视觉测量研究进展	15
1.4.3 机器人的视觉控制研究进展	17
1.4.4 机器人视觉控制的应用现状	20
1.4.5 机器人视觉测量与控制的发展趋势	26
参考文献	29
第 2 章 摄像机与视觉系统的标定	35
2.1 摄像机模型	35
2.1.1 小孔模型	35
2.1.2 摄像机内参数模型	36

2.1.3	镜头畸变模型	38
2.1.4	摄像机外参数模型	40
2.2	单目二维视觉测量的摄像机标定	40
2.3	Faugeras 的摄像机标定方法	42
2.3.1	Faugeras 摄像机标定的基本方法	42
2.3.2	Faugeras 摄像机标定的改进方法	45
2.4	Tsai 的摄像机标定方法	47
2.4.1	位姿与焦距求取	48
2.4.2	畸变矫正系数与焦距的精确求取	51
2.5	手眼标定	51
2.6	基于消失点的摄像机内参数自标定	56
2.6.1	几何法	57
2.6.2	解析法	59
2.7	基于运动的摄像机自标定	66
2.7.1	基于正交平移运动和旋转运动的摄像机自标定	66
2.7.2	基于单参考点的摄像机自标定	71
2.8	基于运动的立体视觉系统自标定	80
2.8.1	相对测量视觉模型	80
2.8.2	自标定原理与过程	87
2.9	畸变校正与非线性模型摄像机的标定	88
2.9.1	基于平面靶标的非线性模型摄像机标定	88
2.9.2	基于平面靶标的大畸变非线性模型摄像机的 标定	94
2.10	结构光视觉的参数标定	103
2.10.1	基于立体靶标的激光平面标定	104
2.10.2	主动视觉法激光平面标定	106
2.10.3	斜平面法结构光视觉传感器标定	112
	参考文献	116
第3章	视觉测量	118
3.1	视觉测量中的约束条件	118
3.1.1	特征匹配约束	118

3.1.2	不变性约束	121
3.1.3	直线约束	123
3.2	单目视觉位置测量	124
3.2.1	垂直于摄像机光轴的平面内目标的测量	125
3.2.2	平面内目标的测量	127
3.3	立体视觉位置测量	129
3.3.1	双目视觉	129
3.3.2	结构光视觉	131
3.4	基于 PnP 问题的位姿测量	132
3.4.1	$P3P$ 的常用求解方法	133
3.4.2	PnP 问题的线性求解	138
3.5	基于矩形目标约束的位姿测量	149
3.5.1	基于立体视觉的位姿测量	149
3.5.2	基于矩形的位姿测量	150
3.5.3	基于 $P4P$ 方法	155
3.6	基于目标模型的测量	155
3.6.1	点的交互矩阵	156
3.6.2	直线的交互矩阵	158
3.6.3	基于 CAD 模型的测量	163
3.7	基于消失点的位姿测量	164
3.7.1	基于消失点的单视点三维测量	164
3.7.2	基于消失点的单视点仿射测量	166
3.8	移动机器人的视觉定位	170
3.8.1	基于单应性矩阵的视觉定位	171
3.8.2	基于非特定参照物的视觉定位	178
3.9	移动机器人的视觉全局定位	184
3.9.1	基于非特定参照物的视觉全局定位	184
3.9.2	视觉定位与里程计推算定位的信息融合	187
3.10	基于天花板的视觉推算定位	191
3.10.1	天花板的视觉特征	192
3.10.2	视觉系统构成	194

3. 10. 3	视觉推算定位	194
3. 10. 4	实验与结果	200
3. 11	MEMS 装配中的显微视觉测量	202
3. 11. 1	显微视觉系统的构成	202
3. 11. 2	显微视觉系统的自动调焦	205
3. 11. 3	显微视觉测量	208
3. 11. 4	实验与结果	211
	参考文献	214
第 4 章	视觉控制	217
4. 1	基于位置的视觉控制	217
4. 1. 1	位置给定型机器人视觉控制	217
4. 1. 2	机器人的位置视觉伺服控制	219
4. 1. 3	基于位置的视觉控制的稳定性	222
4. 1. 4	基于位置的自标定视觉控制	224
4. 1. 5	基于位置视觉控制的特点	225
4. 2	基于图像的视觉控制	226
4. 2. 1	基于图像特征的视觉控制	226
4. 2. 2	基于图像的视觉伺服控制	231
4. 2. 3	基于图像的视觉控制的稳定性	232
4. 2. 4	基于图像的视觉控制的特点	234
4. 3	混合视觉伺服控制	234
4. 3. 1	2. 5D 视觉伺服的结构	235
4. 3. 2	2. 5D 视觉伺服的原理	235
4. 4	直接视觉控制	243
4. 4. 1	直接视觉控制的结构	243
4. 4. 2	visual-motor 函数的实现	244
4. 5	基于姿态的视觉控制	247
4. 5. 1	姿态测量	247
4. 5. 2	基于姿态估计的视觉控制系统的结构与基本 原理	249
4. 5. 3	实验与结果	253

4.6	基于图像雅可比矩阵的无标定视觉伺服	258
4.6.1	动态牛顿法	258
4.6.2	图像雅可比矩阵的估计	260
4.7	基于极线约束的无标定摄像机的视觉控制	262
4.7.1	基本原理	262
4.7.2	视觉伺服控制	263
4.7.3	实验与结果	269
4.8	基于视觉测量信息的智能控制	271
4.8.1	角焊缝跟踪的自调整模糊控制	271
4.8.2	实验与结果	275
	参考文献	277
第5章	应用实例	279
5.1	开放式机器人控制平台	279
5.1.1	多层次结构的开放式机器人控制平台	279
5.1.2	本地机器人的实时控制	280
5.1.3	图形示教实验与结果	282
5.2	具有焊缝识别与跟踪功能的自动埋弧焊机器人系统	283
5.2.1	焊接小车与视觉系统	283
5.2.2	结构光焊缝图像的处理	287
5.2.3	焊缝测量实验结果	291
5.3	基于结构光的机器人弧焊混合视觉控制	293
5.3.1	图像空间到机器人末端笛卡儿空间的雅可比 矩阵	293
5.3.2	混合视觉控制	295
5.3.3	实验与结果	297
5.4	薄板对接窄焊缝视觉跟踪系统	299
5.4.1	视觉跟踪系统构成	300
5.4.2	焊缝视觉测量	301
5.4.3	焊缝初始点定位	307
5.4.4	控制系统设计	308
5.4.5	实验与结果	312

5.5 基于视觉系统自标定的机器人趋近与抓取	315
5.5.1 机器人系统构成	316
5.5.2 基于自标定的视觉控制系统原理	316
5.5.3 实验与结果	320
5.6 基于天花板的移动机器人导航与定位	323
5.6.1 基于天花板自然路标的定位	323
5.6.2 基于天花板的导航	326
5.6.3 实验与结果	326
5.7 打乒乓球机器人	330
5.7.1 打乒乓球机器人系统构成	331
5.7.2 并行处理的高速视觉系统	333
5.7.3 乒乓球飞行轨迹测量	335
5.7.4 后续飞行轨迹与击球参数预测	336
5.7.5 基于球拍位姿的乒乓球旋转估计	338
5.7.6 机器人运动规划与控制	340
5.7.7 实验与结果	343
5.8 大口径光栅拼接	351
5.8.1 系统构成	351
5.8.2 拼接位姿偏差测量	353
5.8.3 实验与结果	356
参考文献	357
附录 摄像机标定工具箱与标定函数	360

第1章

绪论

1.1 机器人视觉控制

1.1.1 机器人视觉的基本概念

在机器人控制领域,视觉控制是当前的一个重要研究方向,也是目前的研究热点之一。机器人视觉控制与计算机视觉、控制理论等学科密切相关,但它采用的概念又有所不同。为便于理解,在此对机器人视觉控制中的部分概念予以简要介绍。

摄像机标定(Camera Calibration):对摄像机的内部参数、外部参数进行求取的过程。通常,摄像机的内部参数又称内参数(Intrinsic Parameter),主要包括光轴中心点的图像坐标,成像平面坐标到图像坐标的放大系数(又称为焦距归一化系数),镜头畸变系数等;摄像机的外部参数又称外参数(Extrinsic Parameter),是摄像机坐标系在参考坐标系中的表示,即摄像机坐标系与参考坐标系之间的变换矩阵。

视觉系统标定(Vision System Calibration):对摄像机和机器人之间关系的确定称为视觉系统标定。例如,手眼系统的标定,就是对摄像机坐标系与机器人坐标系之间关系的求取。

手眼系统(Hand-Eye System):由摄像机和机械手构成的机器人视觉系统,摄像机安装在机械手末端并随机械手一起运动的视觉系统称为Eye-in-Hand式手眼系统;摄像机不安装在机械手末端,且摄像机不随机械手运动的视觉系统称为Eye-to-Hand式手眼系统。

视觉测量(Vision Measure 或 Visual Measure):根据摄像机获得的视觉信息对目标的位置和姿态进行的测量称为视觉测量。

视觉控制(Vision Control 或 Visual Control):根据视觉测量获得目标的位置和姿态,将其作为给定或者反馈对机器人的位置和姿态进行的控制,称为视觉控制。简而言之,所谓视觉控制就是根据摄像机获得的视觉信息对机器人进行的控制。视觉信息除通常的位置和姿态之外,还包括对象的颜色、形状、尺寸等。

视觉伺服(Visual Servo 或 Visual Servoing):利用视觉信息对机器人进行的伺服控制,称为视觉伺服。视觉伺服是视觉控制的一种,视觉信息在视觉伺服控制中用于反馈信号。在关节空间的视觉伺服,直接对各个关节的力矩进行控制。

平面视觉(Planar Vision):只对目标在平面内的信息进行测量的视觉系统,称为平面视觉系统。平面视觉可以测量目标的二维位置信息以及目标的一维姿态。平面视觉一般采用一台摄像机,摄像机的标定比较简单。

立体视觉(Stereo Vision):对目标在三维笛卡儿空间(Cartesian Space)内的信息进行测量的视觉系统,称为立体视觉系统。立体视觉可以测量目标的三维位置信息,以及目标的三维姿态。立体视觉一般采用两台摄像机,需要对摄像机的内外参数进行标定。

结构光视觉(Structured Light Vision):利用特定光源照射目标,形成人工特征,由摄像机采集这些特征进行测量,这样的视觉系统称为结构光视觉系统。由于光源的特性可以预先获得,光源在目标上形成的特征具有特定结构,所以这种光源被称为结构光。结构光视觉可以简化图像处理中的特征提取,大幅度提高图像处理速度,具有良好的实时性。结构光视觉属于立体视觉。

主动视觉(Active Vision):对目标主动照明或者主动改变摄像机参数的视觉系统,称为主动视觉系统。主动视觉可以分为结构光主动视觉和变参数主动视觉。

被动视觉(Passive Vision):被动视觉采用自然测量,如双目视觉就属于被动视觉。

1.1.2 机器人视觉控制的作用

视觉测量与控制在机器人领域占有重要地位^[1-4]。视觉对于机器人,就像明亮的双眸对人一样重要。在工业机器人领域,视觉主要用于目标和机器人末端位姿的测量以及对机器人末端位姿的控制,其典型应用包括焊接、喷涂、装配、搬运等作业。在移动机器人领域,视觉主要用于环境中的目标位姿测量,其典型应用包括机器人视觉定位、目标跟踪、视觉避障等^[1-4]。

在工业生产中应用的工业机器人,一般采用示教或离线编程的方式对加工任务进行路径规划和运动编程,加工过程中只是简单地重复预先编程设定的动作^[1,5,6]。在加工对象的状态发生变化时,加工质量不能满足要求。利用视觉系统能够实时检测加工对象的信息,应用人工智能的理论与方法对这些信息进行处理,可以提高工业机器人的智能化水平,从而在加工对象的状态发生变化时,仍然可以满足加工质量要求。示教或离线编程占用大量的生产时间,在小批量多品种的加工时,该问题尤其突出。而小批量多品种的加工是未来加工业的发展趋势。利用视觉伺服则不需要预先对工业机器人的运动进行编程,可节约大量的编程时间,提高生产效率。特别是对于具有移动能力的操作机器人,由于移动机器人的位置不是一成不变的,所以通过示教方式对加工任务进行工业机器人的路径规划和运动编程也就失去了作用。这就要求机器人能够实时检测加工对象的信息,特别是加工对象的三维位置信息,机器人根据这些信息进行运动规划,从而完成加工任务^[7-10]。因此,研究实时视觉测量与控制系统,对于提高机器人的加工质量和加工效率及拓展机器人的应用范围具有十分重要的意义。

移动机器人一般工作在非结构化环境中,对环境变化的及时感知对于移动机器人的工作至关重要。视觉测量具有测量范围广、信息量大等优势,能够便捷、有效地给出环境信息,是其他类型的传感器无法比拟的。因此,近年来视觉传感器(摄像机)已成为移动机器人的一项必要配置,视觉测量与控制也已经成为移动机器人不可或缺的一项重要功能。

机器人视觉控制能够增加机器人对环境的适应能力,提高机器人的加工精度,增加机器人的工作可靠性。

1.2 机器人视觉控制的研究内容

机器人视觉控制涉及的研究内容比较广泛,主要包括摄像机标定、图像处理、特征提取、视觉测量、控制算法等。其中,摄像机标定、视觉测量和视觉控制的结构与算法是机器人视觉控制研究的主要内容。对于上述各部分研究内容,不同的视觉控制任务所涉及的广度和深度有所不同。

机器人视觉控制与机器视觉的区别,主要体现在二者对实时性的要求具有较大差异,前者往往对实时性有更高的要求。

1.2.1 摄像机标定

通常,在进行摄像机标定时,会在摄像机前方放置一个已知形状与尺寸的标定参照物,该参照物称为靶标^[11]。在靶标上,具有一些位置已知的标定点。图1-1为常用的两种靶标,图1-1(a)为平面靶标,图1-1(b)为立体靶标。在靶标上,黑白方块的交点作为标定点,其空间坐标位置已知。采集靶标图像后,通过图像处理,可以获得标定点的图像坐标。利用标定点的图像坐标和空间位置坐标,可以求出摄像机的内参数和相对于靶标参考点的外参数。

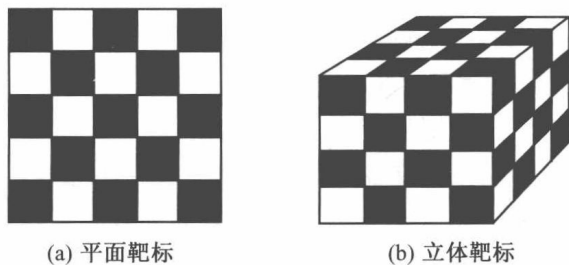


图1-1 常用的两种靶标

但在实际应用中,许多情况不允许在环境中放置特定的标定靶标。因此,不需要标定参照物的摄像机自标定(Self-calibration)技术

越来越受重视,在机器人手眼系统中具有广泛的应用前景。文献[12]提出的摄像机标定,通过摄像机在三维空间内作两组平移运动,其中包括三次两两正交的平移运动,并控制摄像机的姿态进行自标定。该方法无需借助固定参照物,并且实现了线性求解摄像机内参数。文献[13]通过摄像机的四组运动,每组包括两次相互正交的平移运动,获得计算摄像机内参数的非线性方程,解出摄像机的内参数。在上述两种方法中,摄像机的外参数能够通过类似的平移运动和旋转运动得到。文献[13-16]采用了摄像机围绕特定轴转动的方法,实现摄像机的自标定。除此之外,还有研究者利用平行线对摄像机的内参数进行自标定^[17-20]。在忽略摄像机镜头畸变的情况下,如果摄像机的光轴中心线与笛卡儿空间的平行线不垂直,则笛卡儿空间的平行线在图像空间成像后不再平行。每组平行线成像后的直线会有一个交点,这个交点称为消失点或灭点(Vanishing Point)。消失点中含有摄像机的内参数信息,利用多个消失点可以获得摄像机的内参数。

摄像机的标定技术,依然是目前的研究热点^[11-24]。许多研究者针对弱约束、无特定运动条件下的摄像机自标定开展研究,其主要目标是快速准确地获得摄像机的参数。

1.2.2 视觉测量

视觉测量是机器人视觉控制的重要研究内容,也是实现视觉控制的基础。视觉测量主要研究从二维图像信息到二维或三维笛卡儿空间信息的映射以及视觉测量系统的构成等。其中,二维图像信息到二维笛卡儿空间信息的映射比较容易实现,已经是比较成熟的技术。而二维图像信息到三维笛卡儿空间信息的映射以及相关视觉测量系统的构成与测量原理等,依然是目前的研究热点。这一问题又称为三维重建或三维重构(3D Reconstruction)问题。

双目视觉所采用的三角测量原理,早已为本领域的研究人员所熟悉。双目视觉需要对两台摄像机中的特征点进行匹配,匹配误差对视觉测量结果具有明显的影响。对于双目视觉测量,研究重点不在于测量原理,而在于如何提高测量精度。而对于多目视觉测量,通过对多台