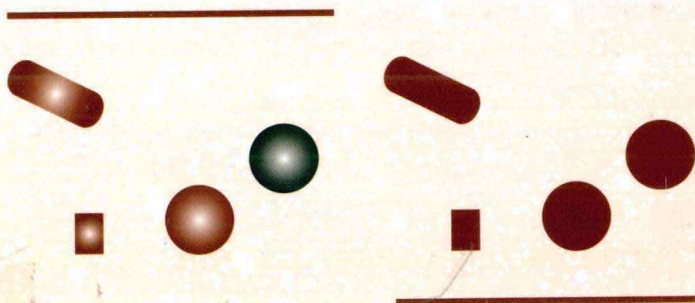


徐德 谭民 李原 编著

Visual Measurement and
Control for Robots

机器人视觉 测量与控制

(第2版)



国防工业出版社
National Defense Industry Press

机器人视觉测量与控制

Visual Measurement and Control
for Robots

(第2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.—2版.

—北京:国防工业出版社,2011.5

ISBN 978-7-118-07327-0

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(2011)第060976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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 10½ 字数 296 千字

2011年5月第2版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 35.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

再版说明

本书第1版初稿完成于2006年初,2007年2月定稿。在此后数年的时间里,国内外在机器人视觉测量与控制领域的研究取得了许多新进展,作者所在的研究组也取得了一些新的研究成果。为了使本书能够更好地反映当前国际国内机器人视觉方面的最新进展,特进行了本次修订再版。

本次再版,作者对第1版的所有章节都进行了修订和充实。除了对各章的文字描述进行了修订之外,还对部分内容进行了调整,并进一步完善了第2章到第5章的内容。

本书的修订再版得到了国防出版社的大力支持,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。

作者

2010年10月

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、视觉控制的应用。本书从控制角度,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示例。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	2
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	14
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	摄像机外参数模型	39
2.2	单目二维视觉测量的摄像机标定	39
2.3	Faugeras 的摄像机标定方法	41
2.3.1	Faugeras 摄像机标定的基本方法	41
2.3.2	Faugeras 摄像机标定的改进方法	44
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	50
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	89
2.9.1	基于平面靶标的非线性模型摄像机标定	89
2.9.2	基于平面靶标的大畸变非线性模型摄像机的 标定	95
2.10	结构光视觉的参数标定	104
2.10.1	基于立体靶标的激光平面标定	105
2.10.2	主动视觉法激光平面标定	107
2.10.3	斜平面法结构光视觉传感器标定	114
	参考文献	118
第3章	视觉测量	120
3.1	视觉测量中的约束条件	120

3.1.1	特征匹配约束	120
3.1.2	不变性约束	123
3.1.3	直线约束	125
3.2	单目视觉位置测量	126
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	146
3.5.1	基于立体视觉的位姿测量	146
3.5.2	基于矩形的位姿测量	147
3.5.3	基于 P4P 方法	152
3.6	基于消失点的位姿测量	152
3.6.1	基于消失点的单视点三维测量	152
3.6.2	基于消失点的单视点仿射测量	154
3.7	移动机器人的视觉定位	159
3.7.1	基于单应性矩阵的视觉定位	159
3.7.2	基于非特定参照物的视觉定位	166
3.8	移动机器人的视觉全局定位	172
3.8.1	基于非特定参照物的视觉全局定位	173
3.8.2	视觉定位与里程计推算定位的信息融合	176
3.9	基于天花板的视觉推算定位	180
3.9.1	天花板的视觉特征	180
3.9.2	视觉系统构成	182
3.9.3	视觉推算定位	183
3.9.4	实验与结果	188
3.10	MEMS 装配中的显微视觉测量	190
3.10.1	显微视觉系统的构成	190

3.10.2	显微视觉系统的自动调焦与视觉测量	192
3.10.3	实验与结果	195
	参考文献	198
第4章	视觉控制	200
4.1	基于位置的视觉控制	200
4.1.1	位置给定型机器人视觉控制	200
4.1.2	机器人的位置视觉伺服控制	202
4.1.3	基于位置的视觉控制的稳定性	205
4.1.4	基于位置的自标定视觉控制	207
4.1.5	基于位置视觉控制的特点	208
4.2	基于图像的视觉控制	209
4.2.1	基于图像特征的视觉控制	209
4.2.2	基于图像的视觉伺服控制	214
4.2.3	基于图像的视觉控制的稳定性	215
4.2.4	基于图像的视觉控制的特点	217
4.3	混合视觉伺服控制	217
4.3.1	2.5D 视觉伺服的结构	218
4.3.2	2.5D 视觉伺服的原理	219
4.4	直接视觉控制	226
4.4.1	直接视觉控制的结构	227
4.4.2	visual-motor 函数的实现	228
4.5	基于姿态的视觉控制	230
4.5.1	姿态测量	231
4.5.2	基于姿态估计的视觉控制系统的结构与基本原理	233
4.5.3	实验与结果	237
4.6	基于图像雅可比矩阵的无标定视觉伺服控制	241
4.6.1	动态牛顿法	242
4.6.2	图像雅可比矩阵的估计	243
4.7	基于极线约束的无标定摄像机的视觉控制	246
4.7.1	基本原理	246

4.7.2	视觉伺服控制	247
4.7.3	实验与结果	252
	参考文献	255
第5章	视觉控制的应用	257
5.1	开放式机器人控制平台	257
5.1.1	多层次结构的开放式机器人控制平台	257
5.1.2	本地机器人的实时控制	258
5.1.3	图形示教实验与结果	259
5.2	具有焊缝识别与跟踪功能的自动埋弧焊机器人系统	261
5.2.1	焊接小车与视觉系统	261
5.2.2	结构光焊缝条纹图像的处理	265
5.2.3	焊缝测量实验结果	269
5.3	基于结构光的机器人弧焊混合视觉控制	272
5.3.1	图像空间到机器人末端笛卡儿空间的 雅可比矩阵	272
5.3.2	混合视觉控制	274
5.3.3	实验与结果	276
5.4	薄板对接窄焊缝视觉跟踪系统	277
5.4.1	视觉跟踪系统构成	277
5.4.2	焊缝视觉测量	279
5.4.3	焊缝跟踪控制	280
5.4.4	实验与结果	281
5.5	基于视觉系统自标定的机器人趋近与抓取	282
5.5.1	机器人系统构成	282
5.5.2	基于自标定的视觉控制系统原理	283
5.5.3	实验与结果	287
5.6	基于天花板的移动机器人导航与定位	290
5.6.1	基于天花板自然路标的定位	290
5.6.2	基于天花板的导航	292
5.6.3	实验与结果	293

5.7 打乒乓球机器人	297
5.7.1 打乒乓球机器人系统构成	298
5.7.2 并行处理的高速视觉系统	300
5.7.3 乒乓球飞行轨迹测量	302
5.7.4 后续飞行轨迹与击球参数预测	304
5.7.5 机器人运动规划与控制	306
5.7.6 实验与结果	308
参考文献	312

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Visual Control for Robots	1
1.1.1 Basic Concepts of Visual Control for Robots	1
1.1.2 Function of Visual Control for Robots	2
1.2 Research Aspects of Visual Control for Robots	4
1.2.1 Camera Calibration	4
1.2.2 Visual Measurement	5
1.2.3 Structure and Algorithm of Visual Control	6
1.3 Classification of Visual System for Robots	6
1.3.1 Classification with the Relative Positions of Camera and Robot	7
1.3.2 Classification with Camera Numbers	8
1.3.3 Classification with Measurement Mode	8
1.3.4 Classification with Control Mode	9
1.4 Current Status and Tendency of Visual Control	10
1.4.1 Development of Visual System Calibration	10
1.4.2 Development of Visual Measurement for Robots	14
1.4.3 Development of Visual Control for Robots	17
1.4.4 Development of Visual Control Application for Robots	20
1.4.5 Tendency of Visual Measurement and Control for Robots	26
References	29

Chapter 2 Camera and Visual System Calibration	35
2.1 Camera Model	35
2.1.1 Pinhole Model	35
2.1.2 Intrinsic Parameters Model	36
2.1.3 Extrinsic Parameters Model	39
2.2 Camera Calibration for 2D Visual Measurement with Monocular Vision System	39
2.3 Faugeras' Camera Calibration Method	41
2.3.1 Basic Calibration Method	41
2.3.2 Improved Calibration Method	44
2.4 Tsai's Camera Calibration Method	47
2.4.1 Calculating Pose and Focal Length	48
2.4.2 Distortion Factor and Fine Focal Length Computation	50
2.5 Hand-Eye Calibration	51
2.6 Intrinsic Parameters Calibration Based on Vanishing Point ...	56
2.6.1 Geometry Method	57
2.6.2 Analytic Method	59
2.7 Camera Self-Calibration Based on Motions	66
2.7.1 Camera Self-Calibration Based on Orthogonal Translations and Rotations	66
2.7.2 Camera Self-Calibration Based on Single Reference Point	71
2.8 Stereovision System Self-Calibration Based on Motions	80
2.8.1 Relative Visual Measure Model	80
2.8.2 Self-Calibration Principle and Process	87
2.9 Distortion Correction and Calibration for Nonlinear Model Camera	89
2.9.1 Calibration for Nonlinear Model Camera Based on Planar Target	89
2.9.2 Calibration for Nonlinear Model Camera with Large Distortion Lens Based on Planar Target	95

Contents

2.10	Parameters Calibration for Structured Light Vision	104
2.10.1	Laser Plane Calibration Based on Cubic Target	105
2.10.2	Laser Plane Calibration Based on Active Vision Method	107
2.10.3	Calibration with Inclined Plane Method for Structured Light Vision Sensor	114
	References	118
Chapter 3	Visual Measurement	120
3.1	Constraints in Visual Measurement	120
3.1.1	Feature Matching Constraint	120
3.1.2	Invariance Constraint	123
3.1.3	Line Constraint	125
3.2	Position Measurement with Monocular Vision	126
3.3	Position Measurement with Stereovision	129
3.3.1	Stereovision	129
3.3.2	Structured Light Vision	131
3.4	Pose Measurement Based on PnP	132
3.4.1	Typical Method for $P3P$ Problem	133
3.4.2	General Recursive Linear Method for PnP Problem	138
3.5	Pose Measurement Based on Rectangle Constraint	146
3.5.1	Pose Measurement Based on Stereovision	146
3.5.2	Pose Measurement Based on Rectangle Constraint	147
3.5.3	Pose Measurement Based on $P4P$ Method	152
3.6	Pose Measurement Based on Vanishing Point	152
3.6.1	3D Measurement with Single View Based on Vanishing Point	152
3.6.2	Affine Measurement with Single View Based on Vanishing Point	154
3.7	Visual Positioning for Mobile Robots	159
3.7.1	Visual Positioning Based on Homography Matrix	159

3.7.2	Visual Positioning Based on Unspecified Reference	166
3.8	Global Visual Positioning for Mobile Robots	172
3.8.1	Global Visual Positioning Based on Unspecified Reference	173
3.8.2	Information Fusion for Visual Positioning and Odometry Dead Reckoning	176
3.9	Ceiling-based Visual Dead Reckoning	180
3.9.1	Visual Features on Ceiling	180
3.9.2	Visual System Configuration	182
3.9.3	Visual Dead Reckoning	183
3.9.4	Experiments and Results	188
3.10	Micro Visual Measurement for MEMS Assembly	190
3.10.1	Configuration of Micro Vision System	190
3.10.2	Auto Focusing of Micro Vision System and Visual Measurement	192
3.10.3	Experiment and Results	195
	References	198
Chapter 4	Visual Control	200
4.1	Position-based Visual Control	200
4.1.1	Visual Control in Position Desired Mode for Robots	200
4.1.2	Position-based Visual Servoing Control for Robots	202
4.1.3	Stability of Position-based Visual Control	205
4.1.4	Position-based Self-Calibration Visual Control	207
4.1.5	Characteristics of Position-based Visual Control	208
4.2	Image-based Visual Control	209
4.2.1	Image-based Visual Control	209
4.2.2	Image-based Visual Servoing Control	214
4.2.3	Stability of Image-based Visual Control	215
4.2.4	Characteristics of Image-based Visual Control	217
4.3	Hybrid Visual Servoing Control	217

Contents

4.3.1	Structure of 2.5D Visual Servoing	218
4.3.2	Principle of 2.5D Visual Servoing	219
4.4	Directly Visual Control	226
4.4.1	Structure of Directly Visual Control	227
4.4.2	Realization of Visual-motor Function	228
4.5	Pose-based Visual Control	230
4.5.1	Pose Measurement	231
4.5.2	Structure and Principle of Pose-based Visual Control System	233
4.5.3	Experiment and Results	237
4.6	Un-calibrated Visual Servoing Control Based on Image Jacobian Matrix	241
4.6.1	Dynamic Newton Method	242
4.6.2	Image Jacobian Matrix Estimation	243
4.7	Un-calibrated Visual Control Based on Epipolar Constraint	246
4.7.1	Basic Principle	246
4.7.2	Stereo Visual Servoing Control	247
4.7.3	Experiment and Results	252
	References	255
Chapter 5	Visual Control Application	257
5.1	Open Structured Robot Control Platform	257
5.1.1	Open Structured Robot Control Platform with Multi-level Hierarchy	257
5.1.2	Real-time Control for Local Robots	258
5.1.3	Image and Graphic Teaching Experiments and Results	259
5.2	Robot System for Buried Arc Welding with Seam Recognition and Tracking	261
5.2.1	Welding Vehicle and Visual System	261