



国防科技图书出版基金

Measurement and Control
Based on Microscopic Vision

Measurement and Control Based on Microscopic Vision

显微视觉测量与控制

徐德 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

显微视觉测量与控制

Measurement and Control Based on
Microscopic Vision

徐 德 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

显微视觉测量与控制 / 徐德著. —北京:国防工业出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-118-09735-1

I. ①显… II. ①徐… III. ①计算机视觉—测量
②计算机视觉—控制 IV. ①TP302.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 262577 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 710 × 1000 1/16 印张 13½ 字数 229 千字

2014 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 58.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

在微操作系统中,为了获得被操作对象的位置和姿态信息,普遍的做法是引入显微视觉对被操作对象以及工具等进行测量。但显微视觉系统与传统的视觉系统具有很大的不同,其视场小、景深小,使得许多传统的视觉测量与控制的方法在显微视觉中难以直接应用,目前的显微视觉测量与控制方面的理论与方法远远不能满足实际需求。随着微光机电系统的快速发展,多种异型零件的微装配越来越普遍;而随着生物医学等领域的不断发展,细胞注射等类型的精密微操作也越来越常见。无论是微装配还是细胞注射类的精密微操作,常常由微操作机器人完成,需要多只操作手之间进行协同作业,迫切需要依靠显微视觉实时获得对象之间、对象与工具之间精确的相对位姿关系以及受力等信息,并根据这些信息控制多只操作手的精密运动,这就对显微视觉测量与控制的理论与方法提出了更高的要求。因此,研究显微视觉测量与控制,对于提高微操作机器人的自主作业能力、提高微操作的效率与质量、拓展机器人的应用范围具有十分重要的意义。

显微视觉具有广阔的应用前景,可应用于工业、生物医学、军事等众多领域。在工业领域,显微视觉不仅可应用于微光机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的装配,而且可用于集成电路芯片的引线键合以及新型材料微观结构的测量等。在生物医学领域,显微视觉可用于细胞注射等微操作,还可用于细菌、动植物组织的测量等。在军事领域,显微视觉可应用于微型传感器的制造等。目前,显微视觉的应用领域还在不断扩展的过程中。

显微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,是一门新兴的综合性前沿学科。显微视觉测量与控制的研究内容主要涉及显微图像采集、图像处理、标定、测量、控制等方面。在显微图像采集方面,主要涉及新型显微镜的研制,特别是基于新原理、新技术的电子显微镜的研制。在图像处理方面,研究人员主要针对生物医学图像的处理开展工作。在标定方面,主要需要解决显微视觉系统与操作手之间关系的标定,以及不同操作手之间关系的标定等。在测量方面,主要涉及不同对象之间相对位姿关系的测量,以及基于形变的受力测量等。在控制方面,主要涉及基于图像特征的视觉控制方法、力/位混合控制方法的研究,以及操作流程方面的研究等。本书以基于多操作手的多种零件的微装配为背景,重点针对显微视觉系统的标定、测量与控制等方面进行论述。

本书是在作者多年从事机器人视觉测量与控制、显微视觉研究的基础上,总结所取得的研究成果,并结合当前国际国内显微视觉方面的最新进展撰写完成的。全书由7章构成,分别为绪论、显微视觉系统构成、显微视觉图像处理、显微视觉系统标定、显微视觉测量、显微视觉控制、基于显微视觉的微操作应用。本书从控制角度,以能够进行工程实现为目标,以机器人微操作为背景,系统全面地介绍了显微视觉系统的构成和标定、显微视觉测量的原理与方法、显微视觉控制的原理与实现,并给出了微操作机器人系统的显微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。

本书中的部分研究工作得到了国家自然科学基金项目(61227804)的资助,作者在此表示诚挚地感谢。本书的出版得到了国防工业出版社的大力支持和帮助,作者在此表示衷心地感谢。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,显微视觉测量与控制方面的研究发展迅速,特别是微操作机器人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显微视觉测量与控制的主要进展,但由于显微视觉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。书中难免存在错误与不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2014年7月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 显微视觉的基本概念	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 显微视觉系统的分类	2
1.2 显微视觉的研究领域与发展历程	3
1.2.1 显微视觉图像采集	4
1.2.2 图像处理	4
1.2.3 显微视觉系统与运动系统标定	5
1.2.4 显微视觉测量	6
1.2.5 显微视觉控制	8
1.2.6 显微视觉的发展历史	8
1.3 显微视觉的应用与发展趋势	13
1.3.1 微观图像采集中的应用	13
1.3.2 微装配中的应用	16
1.3.3 微操作中的应用	21
1.3.4 显微视觉的发展趋势	25
参考文献	26
第2章 显微视觉系统构成	29
2.1 显微镜原理	29
2.1.1 显微镜光学原理	29
2.1.2 显微镜基本结构	31
2.2 显微视觉系统基本原理与特点	33
2.2.1 显微视觉图像成像原理	33
2.2.2 变倍与变物距	36
2.2.3 显微视觉的主要参数与特点	37
2.3 显微视觉系统结构	38
2.3.1 单路显微视觉	38

2.3.2	独立双路显微视觉	40
2.3.3	体视显微视觉	43
2.3.4	多路显微视觉	44
	参考文献	46
第3章	显微视觉图像处理	47
3.1	图像清晰度判定	47
3.1.1	清晰度空域评价函数	47
3.1.2	清晰度频域评价函数	49
3.1.3	清晰度统计评价函数	51
3.1.4	图像清晰度判定实验	51
3.2	图像预处理	54
3.2.1	图像滤波	54
3.2.2	灰度变换	56
3.2.3	边缘锐化	59
3.2.4	图像投影	59
3.2.5	二值化	61
3.3	图像特征提取	62
3.3.1	边缘提取	62
3.3.2	点特征提取	63
3.3.3	直线特征提取	66
3.3.4	圆特征提取	67
3.3.5	形变特征提取	69
3.4	亚像素图像特征提取	70
3.4.1	空间矩法	70
3.4.2	Zernike 矩法	73
3.4.3	基于近似高斯分布法	75
3.5	特征跟踪	77
3.5.1	ROI 区域设定	77
3.5.2	特征跟踪与 ROI 区域更新	78
	参考文献	78
第4章	显微视觉系统标定	80
4.1	基于靶标的立体显微视觉系统标定	80

4.1.1	立体显微视觉系统	80
4.1.2	立体显微视觉系统标定	81
4.2	基于靶标的单目显微视觉系统标定	85
4.2.1	小孔模型标定	85
4.2.2	多项式平面模型标定	89
4.3	基于运动的单目显微视觉系统标定	90
4.3.1	基于运动形成靶标平面的标定	91
4.3.2	图像雅可比模型标定	92
4.3.3	基于两步运动的内外参数模型标定	96
4.3.4	线性模型标定	98
4.4	多路显微视觉与操作手的标定	98
4.5	形变与受力的标定	100
	参考文献	102
第5章	显微视觉测量	103
5.1	立体显微视觉测量	103
5.2	单目显微视觉测量	104
5.2.1	位置与位移测量	104
5.2.2	清晰成像平面测量	106
5.2.3	姿态测量	107
5.3	多路显微视觉测量	109
5.4	基于主动运动的物体表面测量	113
5.5	形变测量与微力检测	117
	参考文献	118
第6章	显微视觉控制	120
6.1	基于位置的显微视觉控制	120
6.1.1	基于位置的显微视觉控制系统原理	120
6.1.2	基于显微视觉的微管微球对接	121
6.2	基于图像的显微视觉控制	129
6.2.1	基于图像的显微视觉控制系统原理	129
6.2.2	基于显微视觉的位姿对准	130
6.2.3	基于图像的显微视觉控制下的趋近与抓取	132
6.3	基于图像雅可比矩阵的显微视觉控制	137
		XI

6.3.1	基于图像雅可比矩阵的显微视觉控制系统原理	137
6.3.2	基于三路显微视觉的微零件对准	138
6.3.3	基于图像雅可比矩阵的显微视觉控制的微管微球对接 ...	149
6.4	力/位混合控制	150
6.4.1	力/位混合控制系统原理	150
6.4.2	基于力/位混合控制的趋近	151
	参考文献	154
第7章	基于显微视觉的微操作应用	155
7.1	基于解耦的微操作	155
7.1.1	视觉与运动的解耦调校	155
7.1.2	夹持器与环形柱状物对准系统的解耦调校	156
7.2	微零件的6自由度对准与装配	163
7.2.1	系统构成	163
7.2.2	装配工作流程	165
7.2.3	控制系统设计	167
7.2.4	标定与控制策略	168
7.2.5	实验与结果	173
7.3	微管微球位姿对准与点胶	180
7.3.1	系统构成	180
7.3.2	装配操作流程	183
7.3.3	控制系统设计	185
7.3.4	调校、标定与控制策略	186
7.3.5	实验与结果	188
7.4	带有力反馈的随动式细胞注射	193
	参考文献	196

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Basic Concept of Microscopic Vision	1
1.1.1 Basic Concept	1
1.1.2 Category of Microscopic Vision System	2
1.2 Research Field and Progress of Microscopic Vision	3
1.2.1 Microscopic Image Capture	4
1.2.2 Image Processing	4
1.2.3 Calibration of Microscopic Vision System and Motion System	5
1.2.4 Microscopic Vision Measurement	6
1.2.5 Microscopic Vision Control	8
1.2.6 Development of Microscopic Vision	8
1.3 Application and Development Tendency	13
1.3.1 Application in Microscopic Image Capture	13
1.3.2 Application in Micro-assembly	16
1.3.3 Application in Micro-operation	21
1.3.4 Development Tendency of Microscopic Vision	25
References	26
Chapter 2 Configuration of Microscopic Vision System	29
2.1 Principle of Microscope	29
2.1.1 Optical Principle of Microscope	29
2.1.2 Basic Structure of Microscope	31
2.2 Basic Principle and Characteristic of Microscopic Vision System	33
2.2.1 Imaging Principle of Microscopic Vision	33
2.2.2 Zoom Lens and Object Distance Changing	36
2.2.3 Main Parameters and Characteristic of Microscopic Vision ...	37
2.3 Structure of Microscopic Vision System	38

2. 3. 1	Monocular Microscopic Vision	38
2. 3. 2	Binocular Microscopic Vision	40
2. 3. 3	Stereo Microscopic Vision	43
2. 3. 4	Multiple Microscopic Vision	44
References		46
Chapter 3	Image Processing of Microscopic Vision	47
3. 1	Image Definition Evaluation	47
3. 1. 1	Definition Function in Space Domain	47
3. 1. 2	Definition Function in Frequency Domain	49
3. 1. 3	Definition Function in Statistics	51
3. 1. 4	Experiments of Image Definition Evaluation	51
3. 2	Image Pre-processing	54
3. 2. 1	Image Filtering	54
3. 2. 2	Grey Transformation	56
3. 2. 3	Edge Sharpening	59
3. 2. 4	Image Projection	59
3. 2. 5	Image Binarization	61
3. 3	Image Feature Extraction	62
3. 3. 1	Edge Extraction	62
3. 3. 2	Point Extraction	63
3. 3. 3	Line Extraction	66
3. 3. 4	Circle Extraction	67
3. 3. 5	Deformation Extraction	69
3. 4	Sub-pixel Feature Extraction	70
3. 4. 1	Space Moment Method	70
3. 4. 2	Zernike Moment Method	73
3. 4. 3	Method Based on Approximate Gauss Distribution	75
3. 5	Feature Tracking	77
3. 5. 1	ROI Area Setting	77
3. 5. 2	Feature Tracking and ROI Area Refresh	78
References		78
Chapter 4	Calibration of Microscopic Vision System	80
4. 1	Target-based Calibration for Stereo Microscopic Vision System	80

4. 1. 1	Stereo Microscopic Vision System	80
4. 1. 2	Calibration for Stereo Microscopic Vision System	81
4. 2	Target-based Calibration for Monocular Microscopic Vision System	85
4. 2. 1	Pinhole Model Calibration	85
4. 2. 2	Polynomial Planar Model Calibration	89
4. 3	Motion-based Calibration for Monocular Microscopic Vision System	90
4. 3. 1	Calibration with Target Plane Formed from Motion	91
4. 3. 2	Image Jacobian Model Calibration	92
4. 3. 3	Calibration of Intrinsic and Extrinsic Parameters Based on Two Steps of Motion	96
4. 3. 4	Linear Model Calibration	98
4. 4	Calibration for Multiple Microscopic Vision System and Manipulators	98
4. 5	Calibration for Deformation and Force	100
	References	102
Chapter 5	Microscopic Vision Measurement	103
5. 1	Measurement Based on Stereo Microscopic Vision	103
5. 2	Measurement Based on Monocular Microscopic Vision	104
5. 2. 1	Position and Displacement Measurement	104
5. 2. 2	Clear Imaging Plane Measurement	106
5. 2. 3	Orientation Measurement	107
5. 3	Measurement Based on Multiple Microscopic Vision	109
5. 4	Object Surface Measurement Based on Active Motion	113
5. 5	Deformation Measurement and Micro-Force Detection	117
	References	118
Chapter 6	Microscopic Visual Control	120
6. 1	Position-based Microscopic Visual Control System	120
6. 1. 1	Principle of Position-based Microscopic Visual Control System	120
6. 1. 2	Micro-pipe and Micro-sphere Assembly Based	

on Microscopic Vision	121
6.2 Image-based Microscopic Visual Control System	129
6.2.1 Principle of Image-based Microscopic Visual Control System	129
6.2.2 Pose Alignment Based on Microscopic Vision	130
6.2.3 Approaching and Grasping via Image-based Microscopic Visual Control System	132
6.3 Image-based Microscopic Visual Control System with Image Jacobian Matrix	137
6.3.1 Principle of Image-based Microscopic Visual Control System with Image Jacobian Matrix	137
6.3.2 Micro-components Alignment Based on Three Microscopic Vision Systems	138
6.3.3 Micro-pipe and Micro-sphere Assembly via Image-based Microscopic Visual Control System with Image Jacobian Matrix	149
6.4 Position/Force Hybrid Control System	150
6.4.1 Principle of Position/Force Hybrid Control System	150
6.4.2 Approaching via Position/Force Hybrid Control System	151
References	154

Chapter 7 Micro Operation Application Based on Microscopic Vision ... 155

7.1 Micro Operation with Decoupling	155
7.1.1 Decoupling Adjustment of Microscopic Vision and Motion	155
7.1.2 Decoupling Adjustment of Aligning System for Gripper and Cylinder-shape Object	156
7.2 Alignment and Assembly with 6-degree-of-freedoms for Micro Components	163
7.2.1 System Configuration	163
7.2.2 Assembly Flowchart	165
7.2.3 Control System Design	167
7.2.4 Calibration and Control Strategy	168
7.2.5 Experiments and Results	173

7.3 Pose Alignment and Insertion and Adhesion of Micro-pipe
and Micro-sphere 180

7.3.1 System Configuration 180

7.3.2 Assembly Flowchart 183

7.3.3 Control System Design 185

7.3.4 System Adjustment and Calibration and Control Strategy ... 186

7.3.5 Experiments and Results 188

7.4 Cell Injection in Master-slave Mode with Force Feedback 193

References 196