



机器人

无标定手眼协调

苏剑波 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

机器人无标定手眼协调

苏剑波 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书介绍机器人手眼关系无标定协调控制的研究成果,在总结已有工作的基础上,着重探索针对动态目标任务的手眼反馈控制策略。全书分三篇描述不同的策略,各自独立又相互关联。上篇以图像雅可比矩阵为工具,讨论图像雅可比矩阵在线估计算法在构建机器人图像反馈控制器中的作用;中篇通过非线性视觉映射模型,将图像特征空间与机器人运动空间联系起来,探讨利用神经网络实现映射的视觉控制方法;下篇进一步分析无标定手眼协调系统内在的非线性映射关系和耦合关系,利用扩张状态观测器在线估计系统总的未建模动态,在控制器设计中加以补偿。

本书可供传感信息处理和机器人智能控制领域的教师、研究人员和工程技术人员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机器人无标定手眼协调/苏剑波著. —北京:电子工业出版社,2010.8

ISBN 978-7-121-11434-2

I. ①机… II. ①苏… III. ①机器人控制—研究 IV. ①TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第141151号

策划编辑:万子芬

责任编辑:万子芬

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14 字数:323千字

印 次:2010年8月第1次印刷

印 数:4000册 定价:39.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

机器人手眼协调模拟了人类眼观察一手操作的行为模式，代表了机器人要在人类社会生存和工作的一类基本技能，是智能机器人领域最重要的组成部分和研究课题之一，它的研究基本上伴随着智能机器人研究的整个过程。机器人手眼协调的技术核心是从视觉传感到机器人操作行为的映射，因此，其关键是要把相对于视觉传感器坐标观察到的目标位置映射到机器人坐标系里去，以规划机器人的操作，这中间隐含的一个关键技术是建立视觉传感坐标系与机器人坐标系之间的映射关系，也就是机器人手眼关系的标定。

智能机器人领域多年的研究经验告诉我们，机器人手眼关系的直接标定是非常困难的，这个问题的研究已经基本上脱离了机器人手眼协调控制的研究，而成为一个相对独立的研究领域了，目前各种应用于不同系统和场合的手眼标定方法的研究仍然非常活跃。

正因为手眼关系的精确标定很困难，很多研究者另辟蹊径，研究不经过手眼关系模型而从视觉传感到机器人操作行为控制的直接映射，即无标定手眼协调。这个研究思路一诞生就吸引了许多的研究者，很快成为智能机器人手眼协调研究领域的主流方向之一，至今已经 20 余年了，其研究热潮仍方兴未艾。

作者在硕士生导师李耀通教授的指导下开始接触这个领域，此后多年兴趣始终没有稍许减弱过，20 余年一直开展这个领域的研究。作者也终身得益于在与李老师朝夕相处的日子里每天看在眼里、记在心里的李老师对科学研究的热爱、执着和勤奋！李老师在担任国家“863 计划”一自动化领域智能机器人主题专家组组长期间，对中国机器人事业的研究和发展起到了举足轻重的奠基和推动作用，培养和扶持了一大批目前仍然活跃在国际、国内机器人研究领域的专家、学者。这本专著也是对李老师培育之恩的一点报答和纪念。

如果说作者在攻读硕士学位阶段的工作主要集中在视觉信息处理方面，那么在攻读博士学位阶段的工作就主要集中在机器人控制器的设计方面了。在博士生导师冯纯伯院士的指点下，作者对控制理论的理解又有了进一步的加深。作者也从冯先生那里学到了学术研究的品位、看待科学问题的眼光以及解决具体问题的技能，尽管三年的时间只能对冯老师的大师风范窥其一斑，也足以让我受用终生，这些都为作者思考研究适合于一类控制器的机器人视觉反馈方式和适合于一类手眼协调模式的机器人控制器设计提供了理论和技术上的保证。

中科院系统所的韩京清研究员提出的无模型控制理论应该是中国控制界值得自豪的成果之一，作者在进行博士后研究阶段有幸接触和了解了这种控制思想。应该说，无模型控制的思想与机器人无标定手眼协调问题的本质有天然的吻合度，两者都是通过在线辨识系统模型的方法来获得系统的瞬时控制输入。尽管无模型控制理论至今尚没有严密的理论成果，但它在很多实际系统上的应用已经证明了该控制思想和技术的可行性和科学性，就像模糊控制理论一样。这里需要特别感谢的是中科院系统所的黄一研究员，是她向作者介绍了无模型控制理论，从而主导了作者其后近 10 年在机器人无标定手眼协调方面的研究工作，也因此促成了这本专著的重要组成内容的诞生。

作者刚开始工作的那一年因凭借研究机器人无标定手眼协调问题获得了平生第一项国家自然科学基金项目的资助，这对作者学术生涯的启动和后续发展起到了至关重要的作用。作者深深体会到了一个有持续生命力的学术研究领域所带来的鼓励和动力，也更加感谢引导我进入这个领域的恩师李耀通先生和冯纯伯先生。凭借这个项目的支持，作者带领学生继续深入研究这个领域的热点问题。从 1998 年起，作者指导了硕士生邱文彬、钱江、马红雨，博士生潘且鲁，对无标定手眼协调问题进行了持续多年的研究。特别值得一提的是马红雨，他凭着对作者的学术思路的完全信任，坚定不移、不折不扣地进行各种艰苦探索，取得了出色的成果，最终以可以跟博士论文成果媲美的硕士论文毕业并荣获上海市优秀硕士论文。

本书内容有很多是来自作者指导的研究生的工作成果，特别是一些作者思想指导下的实验都是他们完成的。作者也对他们辛勤的劳动表示衷心的感谢，除了前面所述的几位以外，还有博士生王军、黄福珍、刘芳、张克军、边后琴、周玮，硕士生刘成刚、朱莉、金亮、张彦俊等。特别感谢他们陪伴作者一起度过了对科学孜孜以求的时光，并给了作者很多的喜悦和满足。

本书是机器人无标定手眼协调领域的第一本专著，由相对独立的三篇组成，内容涉及机器人无标定研究领域的前沿内容和作者的研究成果，凝聚了作者近 20 年来在国家自然科学基金、国家 863 项目、教育部博士点基金项目 and 上海市教委曙光学者项目支持下的研究成果和心得。

本书可供机器人智能控制领域的教师、研究人员、工程技术人员阅读参考。由于作者学识有限，内容会有不足之处，书中所述观点均为作者个人看法，肯定会有片面之处，恳请广大读者给予批评指正。

当然，本书只是多年研究思路和工作成果的一个阶段性小结，作者对机器人无标定手眼协调的研究兴趣不会因为本书的出版而终止。本书向感兴趣的读者全面介绍相关领域的研究思路和目前所取得的点滴成果，期望它的出版能引起更多学者对机器人无标定手眼协调问题的兴趣，同时也寄希望读者能提供新的思路继续进行该领域的研究，如能达此目的，则为作者之大幸也！

目 录

上篇 Kalman 滤波方法

第 1 章 绪论	2
1.1 引言	2
1.2 机器人手眼协调	2
1.2.1 手眼协调技术的历史发展	2
1.2.2 手眼协调系统结构	3
1.3 无标定手眼协调及其控制方法	5
1.3.1 问题的提出	5
1.3.2 传统的无标定方法	5
1.4 本篇的主要工作	6
第 2 章 基于图像雅可比矩阵的无标定手眼协调	8
2.1 图像雅可比矩阵模型	8
2.2 图像雅可比矩阵的例子	9
2.3 应用图像雅可比矩阵建立视觉反馈控制	10
2.4 基于图像雅可比矩阵的手眼协调系统的性能分析	11
2.5 无标定环境下雅可比矩阵的辨识方法	12
第 3 章 基于 Kalman 滤波的雅可比矩阵在线辨识	15
3.1 图像雅可比矩阵的动态辨识	15
3.2 Kalman 滤波估计算法概述	15
3.3 图像雅可比矩阵的在线 Kalman 滤波辨识	16
第 4 章 眼固定+眼在手上的无标定二维运动跟踪	18
4.1 系统与任务描述	18
4.2 全局视觉的无标定手眼协调控制	19
4.2.1 固定摄像机观察二维运动的图像雅可比矩阵	19
4.2.2 固定眼图像雅可比矩阵的在线 Kalman 估计	20
4.2.3 固定眼的视觉反馈控制	21
4.3 眼在手上无标定视觉伺服	21
4.3.1 手上摄像机的图像雅可比矩阵	21
4.3.2 眼在手上图像雅可比矩阵的估计	21
4.3.3 眼在手上的视觉反馈控制率	22
4.4 两种反馈控制率的切换	22
4.5 二维运动跟踪仿真	23
第 5 章 固定双目无标定三维运动跟踪	25
5.1 双目视觉的图像雅可比矩阵	25

5.2	图像雅可比矩阵的在线 Kalman-Bucy 估计	26
5.3	基于图像雅可比矩阵的反馈控制率	27
5.4	三维运动跟踪仿真	28
第 6 章	机器人手眼协调实验系统	31
6.1	系统整体结构	31
6.2	机器人本体	32
6.2.1	机器人本体控制器	32
6.2.2	机器人端控制程序	34
6.3	机器人视觉子系统	34
6.3.1	系统构成	34
6.3.2	图像卡程序开发	36
6.3.3	彩色图像处理	39
6.3.4	图像预处理	41
6.3.5	图像特征与目标识别	45
6.4	通信子系统	45
6.4.1	子系统结构与功能	45
6.4.2	系统通信协议设计	46
6.4.3	模块的具体实现	47
第 7 章	无标定手眼协调运动跟踪实验	50
7.1	眼固定+眼在手上无标定二维运动跟踪实验	50
7.2	无标定三维运动跟踪实验	51
本篇小结		55
参考文献		57

中篇 神经网络方法

第 8 章	绪论	62
8.1	视觉伺服系统分类	62
8.2	视觉处理	63
8.2.1	图像特征	63
8.2.2	视觉估计	63
8.2.3	图像雅可比矩阵	64
8.3	视觉控制器	65
8.4	无标定手眼协调	66
8.5	本篇主要工作	67
第 9 章	基于神经网络的图像雅可比矩阵估计方法	69
9.1	图像雅可比矩阵方法原理	69
9.2	神经网络方法原理	71
9.3	图像雅可比矩阵分析	72
9.4	改进的图像雅可比矩阵方法	74

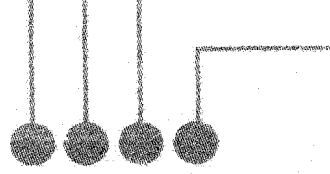
9.5	仿真结果	76
第 10 章	眼固定机器人平面视觉跟踪	78
10.1	平面视觉跟踪问题描述	79
10.2	视觉映射模型	79
10.3	控制策略	80
10.3.1	实时运动规划	81
10.3.2	神经网络映射器	81
10.3.3	仿真结果	82
10.4	基于在线自学习的视觉跟踪	86
10.4.1	小脑模型神经网络	86
10.4.2	仿真结果	88
第 11 章	眼固定机器人三维视觉跟踪	90
11.1	基于立体视觉的 3D 视觉跟踪	90
11.1.1	问题描述	90
11.1.2	基于融合方程的视觉跟踪方法	90
11.1.3	视觉映射模型	91
11.1.4	控制策略	93
11.1.5	仿真结果	94
11.2	基于单摄像机的三维视觉跟踪	96
11.2.1	问题描述	96
11.2.2	视觉映射模型	97
11.2.3	控制策略	98
11.2.4	仿真结果	98
第 12 章	眼在手上机器人平动视觉跟踪	100
12.1	眼在手上无标定方法的现状	100
12.2	机器人平面视觉跟踪	101
12.2.1	问题描述	101
12.2.2	眼在手上机器人视觉跟踪问题分析	102
12.2.3	视觉映射关系模型	104
12.2.4	控制策略	105
12.2.5	仿真结果	107
12.2.6	视觉定位问题	111
12.3	基于立体视觉的 3-DOF 无标定视觉跟踪	112
12.3.1	视觉映射关系模型	113
12.3.2	控制策略	115
12.3.3	仿真结果	117
第 13 章	眼在手上机器人全自由度视觉跟踪	120
13.1	全自由度视觉跟踪问题描述	120
13.2	全自由度视觉跟踪问题分析	121

13.3	视觉映射关系模型	122
13.4	控制策略	123
13.5	模糊神经网络	124
13.5.1	模糊系统与神经网络的比较	124
13.5.2	一种新的模糊神经网络	125
13.6	仿真结果	128
第 14 章	视觉跟踪系统的性能分析与改进	131
14.1	动态视觉控制与运动视觉控制	131
14.2	眼固定构型	132
14.2.1	系统离散域模型	132
14.2.2	跟踪误差分析	133
14.2.3	控制系统稳定性	134
14.2.4	速度前馈控制器	136
14.3	眼在手上构型平面视觉跟踪	138
14.3.1	系统离散域模型	138
14.3.2	跟踪误差分析	139
14.3.3	控制系统稳定性	140
14.3.4	加速度前馈控制器	142
14.4	眼固定构型与眼在手上构型的比较	144
第 15 章	实验研究	145
15.1	系统结构	145
15.1.1	机器人及其控制器	145
15.1.2	CCD 摄像机	146
15.1.3	图像采集卡	146
15.2	实验设计	147
15.3	实验步骤	149
15.4	实验结果	149
	本篇小结	155
	参考文献	156

下篇 扩张状态观测器方法

第 16 章	绪论	162
16.1	引言	162
16.2	本篇主要工作	162
第 17 章	基于扩张状态观测的控制器理论及参数调整	164
17.1	扩张状态观测器	164
17.2	传统 PID 控制器结构分析	165
17.3	自抗扰控制器	165
17.3.1	非线性跟踪微分器	166

17.3.2	非线性状态误差反馈控制律 (NLSEF)	167
17.3.3	自抗扰控制器 (ADRC) 实现形式	168
17.3.4	自抗扰控制器适用对象	169
17.4	自抗扰控制器的参数调整	170
第 18 章	手眼协调系统建模及 ADRC 控制器设计	174
18.1	系统建模	174
18.1.1	摄像机模型	174
18.1.2	摄像机参数	175
18.2	系统模型	176
18.3	控制器设计	177
第 19 章	系统仿真研究	181
19.1	全局固定摄像头无标定二维运动跟踪	181
19.2	眼固定与眼在手上相结合的无标定二维运动跟踪	184
19.3	固定双目无标定三维运动跟踪	188
第 20 章	手眼协调控制器的稳定性分析	190
20.1	全局固定单眼构型情况下控制器形式	190
20.2	一阶跟踪微分器的收敛性分析	190
20.3	二阶扩张状态观测器的收敛性分析	191
20.4	整个控制器的收敛性能分析	195
第 21 章	无标定机器人手眼协调实验研究	196
21.1	机器人手眼协调实验系统描述	196
21.1.1	机器人子系统	197
21.1.2	机器人视觉子系统	197
21.2	单眼固定无标定二维运动跟踪试验	198
21.3	眼固定与眼在手上相结合的无标定二维手眼协调实验	199
21.4	无标定三维手眼协调实验	202
第 22 章	自抗扰控制器和雅可比矩阵在线辨识联合控制的手眼协调研究	205
22.1	控制思想描述	205
22.2	控制器设计	205
22.3	仿真研究	206
22.4	二维跟踪实验	207
本篇小结		209
参考文献		211



上 篇

Kalman 滤波方法

第1章 绪 论

1.1 引言

自 20 世纪 50 年代第一台机器人问世后, 机器人就一直处在从低级到高级的不断发展过程中, 特别是随着传感器技术、计算机技术、电子技术及人工智能技术的发展, 人们已不再满足于只能在固定的已知环境中按照程序设定的功能完成重复作业的机器人, 纷纷开始研究具有高度灵活性、环境适应能力强的智能型机器人。研究工作者们通过给机器人加上外部传感器件, 如力觉、触觉、接近觉、视觉等, 来提高机器人的自主感知和决策规划能力, 以适应周围变化的环境。

在人类感知客观世界的信息中, 有 70% 来自视觉。同样, 机器人视觉能为机器人提供丰富、广泛的外界信息, 并能对环境进行非接触式测量, 所以它被认为是机器人最重要的感知能力^[1]。可以断定, 一旦机器人被赋予视觉能力, 其应用范围必将极大地拓展, 工作性能也会成倍地提高^[2]。

机器人视觉是一个跨学科的研究领域, 涉及图像处理技术、机器人运动学、动力学、控制理论、实时计算等多学科内容。在机器人视觉研究的众多课题中, 手眼协调, 即研究机器人执行器与视觉传感器之间的协调控制策略具有广阔的应用前景, 并成为人们研究的热点。本章首先介绍机器人手眼协调研究的历史发展, 并分析现有手眼协调的系统结构、物理结构和控制结构, 然后针对传统基于标定技术的手眼协调方法的弊端, 引入机器人无标定手眼协调方法的介绍, 分析目前存在的一些研究方法及其局限性, 最后简要地介绍本篇的主要工作。

1.2 机器人手眼协调

1.2.1 手眼协调技术的历史发展

机器人手眼协调的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代。1973 年, Shirai 与 Inoue 将视觉传感用于机器人的控制中, 以提高机器人的定位精度^[3], 但早期由于计算机性能、图像处理器件的限制, 绝大多数系统是将视觉传感以开环的形式结合到机器人的操作中, 即所谓的“static looking then moving”方式。系统工作包括两个阶段, 首先是“look”, 通过摄像机所摄的工件图像, 计算出其空间位姿, 继而是“move”, 即机器人手爪移动到该目标位姿。显然, 该系统是基于静态图像处理的开环伺服系统, 机械手定位精度与下列因素有关:

(1) 视觉系统精度主要受视觉分辨率和视觉标定误差的影响。由于摄像机系统具有显著的非线性特性, 因此要获得精确的目标位姿数据, 需要大量的标定计算, 即必须建

立准确的手眼关系模型并对大量的特征点进行测量^[4]。如果环境因素(如温度)发生变化,为保证模型精度,这样的标定需要反复进行。

(2) 机器人精度主要与机器人逆运动学模型精度、关节位置传感器精度、齿隙、关节控制算法和机械臂柔性等因素有关。

另一种提高机器人操作精度的方法是采用视觉反馈控制,最早的基于视觉反馈的机器人手眼协调控制是由 Hill 和 Park 于 1979 年提出的^[5]。他们利用视觉传感器得到的图像作为反馈信息,构造机器人的闭环位置控制,并将其命名为“视觉伺服”(Visual Servoing),以区别于早期的静态开环系统。

视觉伺服是以实现对机器人的控制为目的而进行的图像自动获取与分析,它利用计算机视觉的原理,快速进行图像处理,在尽量短的时间内给出反馈信息,构成机器人的闭环位置控制。视觉伺服的研究范围很广,既包括机械臂的视觉定位和跟踪,也包括移动机器人的视觉定位和导航,还包括一些特种机器人中的视觉控制。当研究对象是机械臂的视觉定位和跟踪问题时,关于机器人视觉伺服的研究也被称为机器人手眼协调。

机器人手眼协调的研究在最初几年的发展比较缓慢,但从 20 世纪 80 年代末开始,随着图像处理器件和计算机性能的不断提高,机器人视觉技术取得了长足的进步^[6],机器人手眼协调的研究获得了迅猛发展,各种应用系统相继问世,如传送带工件装配系统、导弹跟踪摄像系统、水果采摘系统、自动驾驶系统、焊接系统和邮件分拣系统等^[7]。

1.2.2 手眼协调系统结构

机器人手眼协调系统的一般结构如图 1.1 所示,其中视觉反馈环节通过摄像机感知外界环境及其变化,以及机器人的动作执行状况等,并通过视觉处理技术提供必要的反馈信息;任务决策和控制部分根据任务描述和机器人及工作对象的当前状态,决定机器人相应的操作,进行轨迹规划,给出相应的控制指令,驱动机器人运动。

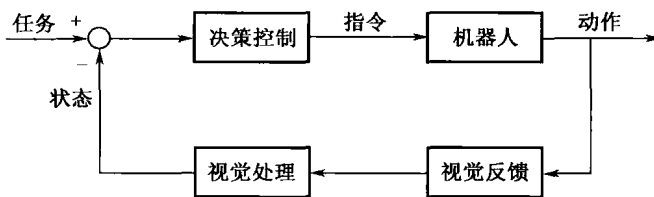


图 1.1 机器人手眼协调系统的一般结构

1) 物理结构

在机器人手眼协调系统中,摄像机有两种典型的安装方式:

(1) 眼固定构型(Fixed Camera)。摄像机固定在机器人空间的某个位置,如正上方或斜侧方等,具有固定的图像分辨率,并可同时获得机械臂及其工作环境的全局图像信息,便于将视觉系统集成到控制中。但采用这种安装方式有如下缺点:在机器人运动过程中,会发生图像特征遮盖现象,观察灵活性差;摄像机无法根据作业要求给出环境的细节描述。

(2) 眼在手上构型。摄像机固定在机器人终端操作器上, 随手爪的运动而运动, 不存在图像特征遮盖问题。同时, 通过调整手爪位姿, 可以让摄像机靠近被观察对象, 提高图像分辨率, 从而提高测量精度。但是, 摄像机的运动容易造成图像的模糊, 给图像特征的准确提取带来一定的困难。此外, 由于摄像机安装在机械臂末端, 增加了机械手的负载, 摄像机也容易受碰撞。当手爪接近目标时, 目标可能会超出摄像机视场。

2) 控制结构

目前, 机器人手眼协调的控制结构通常依据 Sanderson 和 Weiss 所提出的三个原则进行分类^[8]。

(1) 根据图像处理与机器人控制的动作是串行进行还是并行实现, 分为静态和动态的视觉反馈控制。

早期的手眼协调系统由于受硬件计算能力及图像处理技术的限制, 控制结构多采用静态视觉反馈方式。视觉过程和机器人控制过程以时间上串行的方式工作, 在摄像机获取图像前, 机器人本体必须完全停止运动。这种方式具有控制简单、直接等优点, 对于某些应用来说是可接受的。但为了使机器人有快速的响应速度, 以便对快速运动的物体作出反应, 现在的手眼协调系统多采用动态反馈方式。

(2) 根据控制结构是否分层, 分为双闭环系统和单闭环系统。

双闭环系统又称为 Look and Move 系统, 其中内环为关节伺服控制, 可实现高速率采样, 通过关节位置反馈来稳定机器人, 从而获得近似线性的机器人对象特性。外环视觉控制器以比较低的采样速率完成关节角的设定。双环结构将机器人机械运动的奇异性与视觉控制器隔离, 把机器人看做理想笛卡儿运动元件, 简化了设计过程。由于现存机器人大多预留了接收笛卡儿速度给定或位置增量指令的接口, 因此双环结构简单易行, 被广泛采用。这里讨论的机器人系统也采用这种控制方式。

单闭环系统又称为 Direct Visual Servoing 系统, 它取消了关节伺服控制器和关节位置反馈回路, 其功能由视觉伺服控制器取代。单闭环系统的最大优点就是能直接对机器人的底层运动环节进行控制, 因而系统设计的自由度更大, 如果规划合理, 就能得到更加优良的控制性能。然而, 由于机器人系统和视觉系统固有的非线性特性, 视觉伺服控制器的设计成为一大难题; 而且, 为了获得较好的动态响应特性, 要求较高的采样速率, 这给工程实现带来了一定的困难。

(3) 根据反馈信号的表达方式, 分为基于位置和基于图像的控制方式。

基于位置的控制方式, 其反馈信号在三维任务空间以直角坐标形式定义。基本原理是通过对图像特征的抽取, 结合已知的目标几何模型及摄像机模型, 在三维笛卡儿坐标系中对目标位姿进行估计, 然后根据机械手当前位姿与目标位姿之差, 进行轨迹规划并计算出控制量, 驱动机械手向目标运动, 最终实现定位、抓取功能。该方式的控制精度在很大程度上依赖于目标位姿的估计精度, 但位姿估计与手眼系统参数标定密切相关, 因此要保证这一估计过程的准确度是十分困难的。在某些情况下, 这种基于位置的控制对标定参数十分敏感。

基于图像的控制方式, 直接由图像中的误差信号计算出控制量, 驱动机械手向目标运动, 完成设定任务。对于抓取静止目标的任务, 该误差仅是机械手图像特征的函数;

而若是跟踪运动目标，误差同时还是运动目标图像特征的函数。该方法不必估计目标在笛卡儿坐标系中的位姿，减少了计算时延，并且对摄像机模型误差与运动学标定误差相对不敏感。基于图像控制方法的焦点是如何根据图像特征定义机器人的任务，以及如何根据图像特征设计机器人的控制。

1.3 无标定手眼协调及其控制方法

1.3.1 问题的提出

传统的机器人手眼协调大都是基于系统标定技术的，包括摄像机内部参数标定、机器人运动学标定、手眼关系标定，其中手眼关系的标定精度对系统最终控制性能的影响尤为明显。由于现有的机器人控制器一般都采用双闭环控制结构，机器人的马达驱动、力矩控制对用户来说是完全透明的，可将其视为理想的笛卡儿运动元件。因此，在确定二维图像空间与三维任务空间的映射关系时，主要考虑摄像机内部参数和外部参数（即手眼关系参数）的确定。

采用基于标定的方法实现机器人手眼协调，需预先对摄像机的内外参数进行标定，然后根据已知模型和标定好的摄像机参数，建立图像空间与机器人操作空间的映射。由于以下原因，这种基于标定的机器人手眼协调方法受到了很大限制：

(1) 由于多种因素的影响，即使理论上精度很高的标定算法在实际中也难以得到控制和系统性能所要求的模型。

(2) 系统的标定结果只有在标定条件成立时才有效，所以，一旦摄像机的位置、焦距等发生微小变化后，根据原标定参数计算出的结果会有很大误差，必须进行重新标定。

(3) 由于摄像机镜头畸变等因素的影响，摄像机的标定区域一般限制在一个比较小的区域，如果机器人的工作范围比较大，就难以得到一个满足工作范围内所有位置的参数模型。在这样的情况下，虽然可以采取分区域标定的办法，但这又是以增加系统操作复杂度为代价的。

(4) 在某些特定环境下是难以对摄像机进行标定的，如在一些危险的或对人体有害的工作环境中。

鉴于以上原因，有必要探寻一种新的对环境适应能力更强、鲁棒性更好的手眼协调方法。

1.3.2 传统的无标定方法

为了克服基于标定方法的弊端，人们在研究机器人手眼协调的过程中，提出了无标定方法。它是指在不预先标定摄像机和机器人参数的情况下，直接通过图像上的系统状态误差来设计控制律，驱动机器人的运动，使系统误差收敛到一个容许的误差域内。

对于无标定条件下的机器人手眼协调方法的研究是从 20 世纪 90 年代初开始的，并已逐渐成为众多学者的研究热点。比较典型的例子如下：Herve (1991) 论述了传感信息从图像空间直接映射到机器人控制输入空间的可能性和可行性^[9]；Cooperstock 和 Milios

(1993)采用神经网络的方法在无标定的情况下实现了机器人的定位和抓取工作^[10]; Hager (1994)研究了手眼分离配置下,任意放置的双摄像机组成立体视觉监控机械臂抓物的手眼协调系统^[11]; Yoshimi (1995)利用一个装在手上的摄像机引导手爪完成插孔作业,先通过手的实验运动估计雅可比矩阵,然后确定机器人的运动,机器人运动到新位置后重复此过程,直至完成插入任务^[12]; Nguyen 和 Graefe (1997)利用多个未标定的摄像机,实现了三维空间中对多种形状物体的抓取工作^[13]; Sutanto (1997)等人研究了通过在线估计图像雅可比矩阵实现无标定手眼协调的方法,着重讨论了如何避免在线估计雅可比矩阵时的奇异问题^[14]; Hsu 和 Aquino (1999)研究了通过自适应控制实现无标定手眼协调的方法,着重讨论了系统的动态特性^[15]。

从本质上讲,无标定手眼协调是一个具有未建模动态的非线性系统控制问题。根据所使用的描述系统非线性模型及解决未建模动态方法的不同,现有无标定手眼协调的研究方法大致可分为以下三类:基于图像雅可比矩阵的方法、神经网络拟合手眼关系方法和 ADRC 系统未建模动态补偿方法。

基于雅可比矩阵的方法力图用线性关系逼近系统非线性在采样点的瞬时表现,并用这种近似线性化模型建立图像反馈控制。例如, Yoshimi 和 P. K. Allen 利用试探运动估计当前的图像雅可比矩阵,完成二维平面上插轴入孔的任务^[16]。而神经网络方法则试图利用人工神经网络强大的函数拟合能力,从全局把握手眼系统的非线性特性,并在此基础上建立图像反馈控制率。

目前,无标定手眼协调的研究已经在静态的任务目标上取得了令人振奋的成果,如机械手的空间定位^[20]、平面上的插轴入孔操作^[16]以改抓取空间具有 3D 形状的物体^[21]等,但在实际的应用环境中,更多的是运动跟踪等动态手眼协调任务。动态任务环境对手眼系统的视觉处理速度、算法的效率等提出了更高的要求,目前这方面的研究还处于起步阶段。

1.4 本篇的主要工作

本篇的工作主要集中在基于图像雅可比矩阵在线估计的机器人无标定手眼协调控制策略上,提出了一种基于 Kalman 滤波算法的雅可比矩阵在线辨识方法,并应用其建立直接图像特征反馈控制,在手眼关系无标定的情况下实现机器人对未知运动目标的跟踪。

第 2 章对基于图像雅可比矩阵的无标定手眼协调进行了具体介绍,分析了图像雅可比矩阵的定义、特点及其在图像反馈控制器设计中的应用。此外,针对无标定系统的特点,分析了图像雅可比矩阵模型的辨识问题。

第 3 章给出了本篇主要的理论工作,针对传统雅可比矩阵在线估计算法的缺点,提出用 Kalman 滤波器解决图像雅可比矩阵的在线辨识问题;给出了算法的详细描述,并分析了这种方法的优越性。

第 4 章给出了算法应用的一个具体例子——利用眼固定加眼在手上构成的组合双目视觉,实现对未知二维平面运动的精确跟踪。Kalman 滤波算法被用于固定眼的图像雅可比矩阵在线辨识。

第 5 章分析了一个固定双目机器人视觉系统的无标定三维运动跟踪任务。分析并建立系统的图像雅可比矩阵，应用第 3 章所给出的 Kalman 滤波在线估计算法，实现无标定机器人跟踪未知三维空间运动的任务。仿真结果显示了其相比于其他无标定方法的优越性。

第 6 章介绍了所使用的机器人多传感器实验系统，给出了整个系统的模块结构，逐一分析了各个子系统的功能划分和设计实现。

第 7 章给出了二维运动跟踪和三维运动跟踪的实验结果，以翔实的数据和图表，验证了本篇所提出的基于雅可比矩阵在线 Kalman 滤波估计的无标定手眼协调算法。

最后，本篇小结对已取得的研究成果进行了简单的总结并展望了下一步的研究动向。