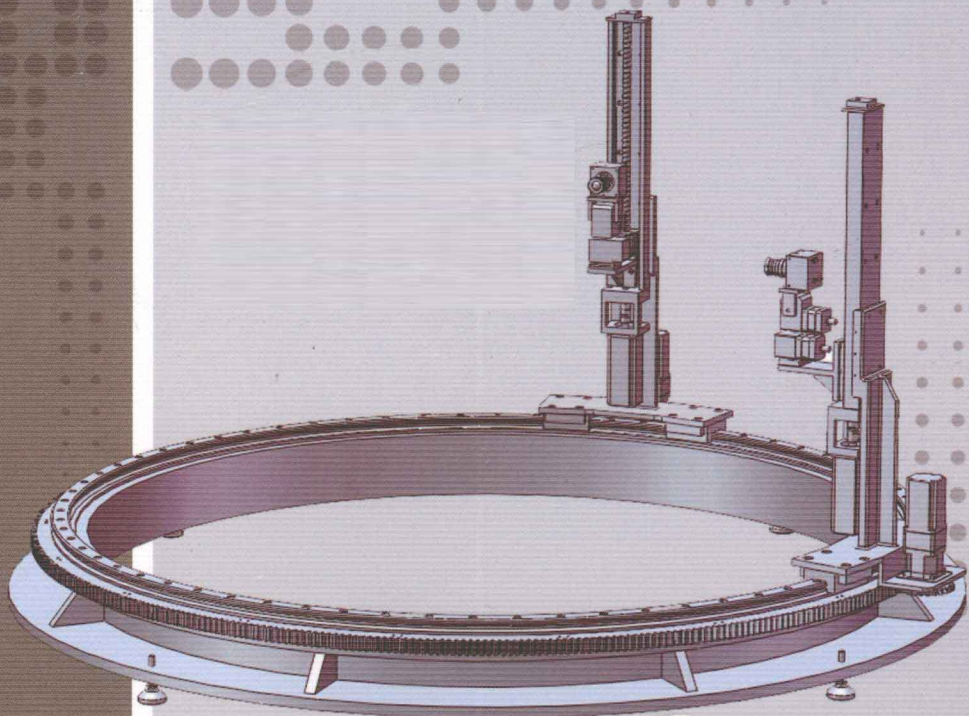





国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 并联机器人 视觉技术及应用

孔令富 等著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 并联机器人视觉 技术及应用

孔令富 张世辉 赵立强 窦燕 著



机械工业出版社

本书详细讨论了适合于并联机器人的新型视觉装置及其在应用过程中涉及的相关理论和技术问题。主要内容涉及并联机器人双目主动视觉监测平台装置的机械设计、电气控制设计、运动学模型、标定体系、正视图观测模式与视觉跟踪及有关软件系统等。在此基础上,以并联机器人完成汉字雕刻为背景,给出了视觉并联雕刻机器人在刀具定位、刀具位姿与运动参数分析、刀具检测等方面的具体应用。书中还结合结构光和并联机器人技术介绍了并联机器人结构光视觉系统的设计方案、数据获取、多视点云数据自动配准方法及在三维重构领域的应用。

本书汇聚了作者近年来在智能并联机器人领域关于视觉技术的前沿研究成果,可作为自动化、机械工程、计算机等学科高年级本科生、研究生的选修教材,也可作为高等院校相关专业的教师、研究工作者及工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

并联机器人视觉技术及应用/孔令富等著. —北京:机械工业出版社, 2012. 7

国家科学技术学术著作出版基金资助出版  
ISBN 978-7-111-38789-3

I. ①并… II. ①孔… III. ①机械人视觉—研究 IV. ①TP242. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第126641号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:高倩 责任编辑:高倩 韩静

版式设计:纪敬 责任校对:张媛

封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.5印张·218千字

0 001—1 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-38789-3

定价:34.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言


作为串联机器人的对偶机构，并联机器人具有刚度大、精度高、位置误差累积等特点，已成为机器人领域的研究热点。目前，并联机器人在航空、航天、海底作业、制造、辅助医疗和微机电系统等领域有着广泛而重要的应用。

虽然针对并联机器人的理论研究和实际应用均已取得了大量成果，但在并联机器人的机构学、运动学、动力学、运动控制、路径规划、智能化及实际应用方面仍存在一些挑战性的课题。为了充分发挥并联机器人的优点，克服并联机器人目前的“盲”工作现状，提高其智能性并扩大其应用范围，我们开展了并联机器人视觉技术及应用方面的研究。首先，需要设计新型的并联机器人视觉装置模型；其次，必须解决该装置的机械结构、电气控制、标定方案、视觉运动理论等关键问题；再次，为了检验所研制的并联机器人新型视觉装置的可用性，还需要以合适的应用领域为背景，开展相关实验验证工作。

本书正是针对上述问题展开论述，全书内容共分11章。第1章为绪论；第2章至第8章论述并联机器人双目主动视觉监测平台的设计、实现及应用中涉及的相关理论和技术；第9章至第11章论述并联机器人结构光视觉系统的组成、标定、数据获取、点云配准及实际应用。

本书是孔令富教授领导的课题组近年来在并联机器人视觉技术领域的最新研究成果。在书稿即将完成之际，作者特别感谢哈尔滨工业大学蔡鹤皋院士，感谢燕山大学黄真教授和课题组的其他成员，正是他们的大力帮助和支持才使本书顺利完成。还要感谢国家高技术发展研究计划（863）项目和河北省自然科学基金对该研究的资助。最后，感谢国家科学技术学术著作出版基金的资助及机械工业出版社对本书出版的支持。

由于并联机器人视觉技术涉及多学科的交叉，加上作者时间和水平有限，书中内容存在缺点、错误和不足在所难免，敬请广大读者、朋友和各方面专家不吝赐教，给予批评指正。



2012年1月于燕山大学

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 并联机器人 .....	1
1.1.1 并联机器人的特点 .....	1
1.1.2 并联机器人的历史及应用 .....	2
1.2 机器视觉 .....	4
1.2.1 主动视觉 .....	4
1.2.2 主动视觉机构构型 .....	6
1.3 并联机器人视觉技术 .....	7
1.3.1 并联机器人的视觉需求 .....	7
1.3.2 几种典型的并联机器人视觉系统 .....	8
1.3.3 并联机器人双目主动视觉监测平台 .....	9
1.3.4 并联机器人结构光视觉系统 .....	11
1.4 本书主要内容 .....	12
<b>第 2 章 并联机器人双目主动视觉监测平台样机设计与分析</b> .....	13
2.1 样机总体设计方案 .....	13
2.2 样机分析与设计 .....	14
2.2.1 几何模型创建 .....	14
2.2.2 定义约束和运动 .....	15
2.2.3 虚拟样机仿真分析 .....	16
2.2.4 样机有限元分析 .....	19
2.3 样机加工装配 .....	21
<b>第 3 章 并联机器人双目主动视觉监测平台样机控制系统设计</b> .....	22
3.1 样机控制方案设计及主要设备选型 .....	22
3.1.1 控制方案设计 .....	22
3.1.2 主要设备选型 .....	22
3.2 样机伺服运动控制系统的研究 .....	25
3.2.1 电动机控制系统的设计 .....	25
3.2.2 FPGA + DSP 的电动机运动控制卡 .....	25
3.2.3 交流伺服电动机运动控制 .....	26
3.2.4 步进电动机运动控制 .....	31
3.3 样机电气控制系统的组成 .....	36

<b>第 4 章 并联机器人双目主动视觉监测平台运动学模型</b> .....	39
4.1 并联机器人双目主动视觉监测平台样机 .....	39
4.2 视觉平台的机构模型 .....	40
4.3 视觉平台的位置正反解模型 .....	42
4.4 视觉平台的速度正反解模型 .....	45
4.5 视觉平台的加速度正反解模型 .....	48
<b>第 5 章 并联机器人双目主动视觉监测平台标定体系</b> .....	57
5.1 并联机器人双目主动视觉监测平台立体标靶块的设计 .....	57
5.1.1 立体标靶块的布局设计 .....	57
5.1.2 梯形靶面的标志点设计 .....	58
5.2 监测平台视觉模型的建立 .....	59
5.2.1 摄像机模型及标定 .....	59
5.2.2 摄像机的动态标定 .....	60
5.2.3 标定实验 .....	61
5.3 并联机器人双目主动视觉监测平台结构参数和脉冲控制当量的测定 .....	63
5.3.1 结构参数 $r$ 及云台俯仰电动机脉冲控制当量 $E_p$ 的测定 .....	64
5.3.2 结构参数 $\theta$ 及云台平转电动机脉冲控制当量 $E_t$ 的测定 .....	65
5.3.3 丝杠电动机脉冲控制当量 $E_l$ 的测定 .....	66
5.3.4 结构参数 $R$ 及圆轨小车电动机脉冲控制当量 $E_c$ 的测定 .....	66
5.3.5 结构参数和脉冲控制当量的测定结果 .....	67
5.4 样机机械加工精度测试 .....	68
5.4.1 圆轨平面度、圆度及与水平面的平行度测试 .....	68
5.4.2 丝杠直线度及与圆轨平面的垂直度测试 .....	70
5.4.3 圆轨小车电动机控制精度测试 .....	71
5.4.4 丝杠电动机控制精度测试 .....	72
5.4.5 云台俯仰、平转电动机控制精度测试 .....	73
<b>第 6 章 并联机器人双目主动视觉监测平台正视观测模式与视觉跟踪</b> .....	75
6.1 并联机器人双目主动视觉平台光轴可达域的确定 .....	75
6.2 并联机器人双目主动视觉平台观测模式的定义 .....	76
6.3 摄像机观测注意点的转移 .....	77
6.3.1 摄像机观测注意点转移的假定 .....	77
6.3.2 摄像机观测注意点转移策略 .....	78
6.4 双目正视模式的调整策略 .....	86
6.5 双目正视模式下的视觉跟踪 .....	90
6.6 实验测试及结果 .....	92
6.6.1 凝视和正视调整测试 .....	92
6.6.2 正视模式下的视觉跟踪测试 .....	96
<b>第 7 章 并联机器人双目主动视觉监测平台系统软件设计</b> .....	99

7.1 视觉平台系统软件总体设计 .....	99
7.2 控制系统软件设计 .....	100
7.2.1 伺服电动机运动模块 .....	101
7.2.2 数字云台控制模块 .....	102
7.2.3 摄像机控制模块 .....	102
7.3 视觉服务系统软件设计 .....	103
7.3.1 摄像机标定模块 .....	104
7.3.2 系统参数测定模块 .....	104
7.3.3 运动分析模块 .....	106
7.4 视觉系统和控制系统的数​​据交换 .....	108
<b>第8章 并联机器人视觉监测与视觉导航应用研究 .....</b>	<b>110</b>
8.1 视觉并联机器人汉字雕刻系统的总体设计 .....	110
8.1.1 工作原理 .....	110
8.1.2 主要功能 .....	111
8.1.3 系统硬件组成 .....	111
8.1.4 雕刻系统软件功能 .....	111
8.2 基于视觉注意机制的视觉并联雕刻机器人刀具检测 .....	112
8.2.1 SECO 模型 .....	113
8.2.2 目标图像的分割 .....	113
8.2.3 目标轮廓的感知 .....	114
8.2.4 实验结果及分析 .....	115
8.3 视觉并联机器人刀具位姿及运动参数分析 .....	117
8.3.1 圆台标靶设计及其视觉信息计算 .....	118
8.3.2 圆台标靶特征点的提取与坐标计算 .....	119
8.3.3 目标刀具位姿的计算 .....	120
8.3.4 基于扩展卡尔曼滤波的目标刀具运动分析 .....	120
8.3.5 实验结果 .....	123
8.4 视觉并联雕刻机器人刀具导向期望加工位置研究 .....	125
8.4.1 并联雕刻机器人刀具的视觉坐标与世界坐标 .....	126
8.4.2 并联雕刻机器人刀具导向理想工作点的方法研究 .....	127
<b>第9章 并联机器人结构光视觉系统总体设计 .....</b>	<b>131</b>
9.1 系统研究背景和意义 .....	131
9.2 系统工作原理 .....	132
9.2.1 光学三角测量法原理 .....	132
9.2.2 结构光的分类及选择 .....	132
9.2.3 编码结构光三维视觉原理 .....	133
9.3 系统结构与建模 .....	134
9.3.1 系统结构 .....	134

---

9.3.2 系统模型 .....	135
<b>第 10 章 并联机器人结构光视觉系统标定及数据获取 .....</b>	<b>137</b>
10.1 一种棋盘格图像内外角点检测算法 .....	137
10.1.1 角点初定位 .....	138
10.1.2 内部角点检测 .....	138
10.1.3 外围角点检测 .....	139
10.1.4 亚像素级角点定位 .....	140
10.1.5 算法实现 .....	140
10.1.6 实验及分析 .....	141
10.2 视觉系统中基于并联机构的摄像机线性标定方法 .....	143
10.2.1 一阶径向畸变摄像机模型 .....	143
10.2.2 借助并联机构构造虚拟三维标靶 .....	146
10.2.3 摄像机参数标定 .....	147
10.2.4 仿真实验 .....	149
10.2.5 真实实验 .....	150
10.3 视觉系统中基于并联机构的结构光标定方法 .....	151
10.3.1 基于 De Bruijn 序列的结构光校验编码方案 .....	152
10.3.2 结构光编码的识别 .....	152
10.3.3 基于并联机构动平台位姿信息的视点三维坐标计算 .....	153
10.3.4 结构光平面方程求解 .....	156
10.4 视觉目标数据获取 .....	158
<b>第 11 章 并联机器人结构光视觉系统点云配准及三维重构 .....</b>	<b>160</b>
11.1 基于并联机构的结构光视觉系统多视点点云数据自动配准研究 .....	160
11.1.1 视觉目标运动模式时的多视点点云自动配准 .....	160
11.1.2 摄像机运动模式时的多视点点云自动配准 .....	162
11.1.3 点云配准分析 .....	162
11.2 三维重构及现状分析 .....	163
11.3 并联机器人结构光视觉系统三维重构应用实例 .....	164
<b>参考文献 .....</b>	<b>167</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 并联机器人

并联机器人是机器人研究领域的一个重要分支。它可以严格定义为：动平台和定平台通过至少两个独立的运动链相连接，机构具有两个或两个以上自由度，且以并联方式驱动的一种闭环机构<sup>[1]</sup>。并联机器人具有刚度大、精度高、承载能力强、动力性能好、易于反馈控制等优点。作为串联机器人的对偶机构，其理论和应用研究得到了日益广泛的关注，已成为机器人研究领域不可缺少的组成部分<sup>[2]</sup>。

### 1.1.1 并联机器人的特点

并联机器人与传统的串联机器人在机构学、运动学、动力学等方面都有很大的不同，其中某些方面形成对偶关系。下面是在与串联机器人比较的基础上得到的并联机器人的主要特点。

1) 并联机器人驱动装置可以安放在基座或接近基座的位置，故其运动部件的质量和惯量可以大大减小，因此动态性能好，可以实现高速运动，而串联机器人在其运动部件中有驱动元件，不可避免地增大了运动部件的质量和惯量。

2) 并联机器人一般可以实现基座驱动器的良好密封，故可以工作在诸如高温、辐射、潮湿、太空和水下等恶劣的环境中，而串联机器人很难实现驱动器的良好密封。

3) 并联机器人运动学反解容易而正解相当复杂，串联机器人正解容易且唯一而反解复杂且可能多值，故在工作空间中进行并联机器人的位置控制较容易，而在串联机器人中确定末端操作器的位置相对较容易。

4) 并联机器人由于不存在驱动器累积误差，其位置精度较高，而串联机器人由于存在驱动器累积误差，位置精度相对较差。

5) 并联机器人的运动平台通过几个运动链以并联方式与基座相连接，因此承载能力强、刚性好、结构紧凑，而串联机器人是由各个杆以悬臂梁形式串联组成，刚性较差，有时为了提高刚性，必须加大各个杆件的尺寸，使得机构质量和惯量都增大，动力学性能下降。

6) 并联机器人机构通常采用对称式结构，故具有较好的各向同性。

7) 并联机器人具有运动学奇异和力奇异，在奇异点处，机器人可能失去约

束度，即获得额外的自由度，而串联机器人只有运动学奇异，在奇异点处只能失去自由度。

8) 工作空间小、可操作性差是并联机器人的缺点，而串联机器人的工作空间很大，可操作性好。

### 1.1.2 并联机器人的历史及应用

并联机构的出现可以追溯到1931年，图1-1是Gwinnett<sup>[3]</sup>在其专利中提出的一种基于球面并联机构的娱乐装置。1940年，Pollard<sup>[4]</sup>在其专利中提出了一种空间作业并联机构，用于汽车的喷漆，如图1-2所示。

图1-3所示为Gough<sup>[5]</sup>在1962年发明的一种基于并联机构的六自由度轮胎检测装置。三年后，Stewart<sup>[6]</sup>首次对Gough发明的这种机构进行了机构学意义上的研究，并将其推广应用为飞行模拟器的运动产生装置，如图1-4所示。这种机构也是目前应用最广的并联机构，被称为Gough-Stewart机构或Stewart机构。从结构上看，Stewart机构的动平台通过六个相同的独立分支与定平台相连接，每个分支中含有一个连接动平台的球铰、一个移动副和一个连接定平台的球铰，为避免绕两个球铰中心连线的自转运动，通常也用一个万向铰来代替其中一个球铰。

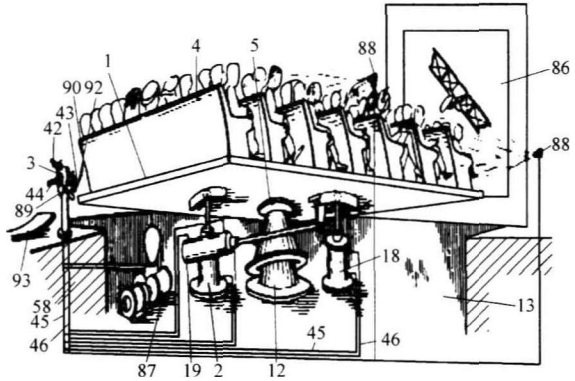


图 1-1 并联娱乐装置

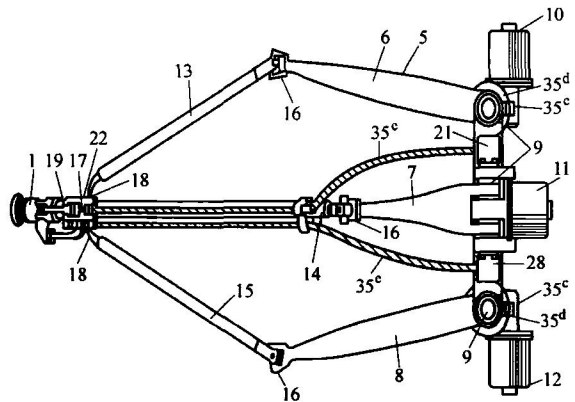


图 1-2 Pollard 的并联机构

1978年，Hunt<sup>[7]</sup>首次提出把六自由度并联机构作为机器人操作器，由此拉开了并联机器人研究的序幕，但在随后的近十年里，并联机器人的研究似乎停滞不前。直到20世纪80年代末90年代初，并联机器人才再度引起领域界的广泛关注，成为国际研究的热点。

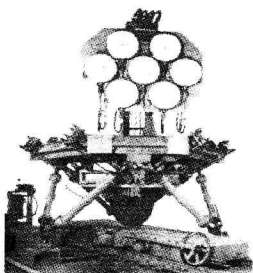


图 1-3 Gough 并联机构

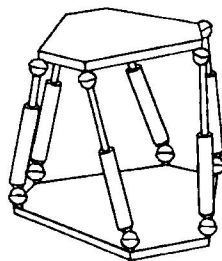


图 1-4 Stewart 并联机构

在国内，黄真教授等人于1990年研制出我国第一台六自由度并联机器人样机（见图1-5），1994年研制出一台柔性铰链并联式六自由度机器人误差补偿器（见图1-6），1997年与孔令富教授、方跃法教授合作出版了我国第一部关于并联机器人理论及技术的专著等<sup>[1]</sup>。

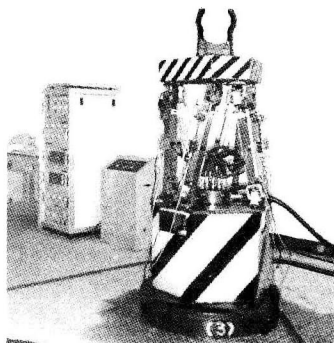


图 1-5 燕山大学的并联机器人

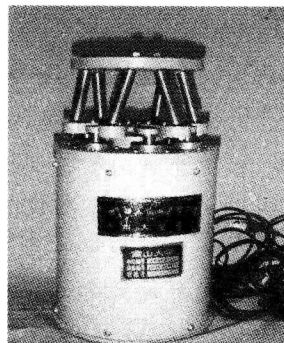


图 1-6 具有弹性球铰的并联误差补偿器

目前并联机器人在航空、航天、海底作业、机电工业、微机电系统和辅助医疗等方面都有十分重要的应用。根据并联机器人的特点，其在高刚度、高精度或者大载荷而无需很大工作空间的如下领域已得到广泛应用，且应用领域还在不断拓展。

- 1) 运动模拟器。
- 2) 精确定位调整装置。
- 3) 装配作业。
- 4) 与串联机器人结合组成串并联机器人。
- 5) 机械加工。
- 6) 采掘工程。
- 7) 空间技术。

- 8) 海洋工程。
- 9) 娱乐装置。
- 10) 医学和生物工程。

## 1.2 机器视觉

机器视觉系统是指通过机器视觉产品将被摄取目标转换成图像信号, 传送给专用的图像处理系统, 根据像素分布、亮度和颜色等信息, 转变成数字化信号; 图像系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征, 进而根据判别的结果来控制现场设备的动作。

机器视觉技术融合视觉传感技术、图像理解技术、模式识别技术以及计算机控制技术, 用机器代替人眼来做测量和判断, 是实现系统智能化、自动化、信息化的先进技术。机器视觉系统的应用, 能大大提高设备使用效率、精度及可靠性。

20 世纪 70 年代中期到 80 年代初期, Marr<sup>[8]</sup>首次提出了较为完善的计算机视觉理论框架, 也称为视觉计算理论。视觉计算理论对机器视觉的发展产生了巨大影响, 并最终形成了这一领域的主导思想。Marr 的视觉计算理论立足于计算机科学, 系统地概括了心理物理学、神经生理学、临床神经病理学等方面取得的重要成果。随着数字图像的高分辨率采集技术、识别技术的发展, 机器视觉已成为认知环境信息的主要技术, 并且已成功应用于各类监测、环境识别、导航控制、人机界面等领域, 其核心思想是从数字图像中恢复物体的三维形状<sup>[9]</sup>。

### 1.2.1 主动视觉

早期的视觉系统多为被动视觉系统, 视觉传感器相对工作空间是静止的, Marr 的理论起着主导作用, 它强调了计算理论的重要性, 希望能够精确地获得外部世界的三维结构。这种视觉处理方式, 其优点在于机构实现容易、模型简单, 但局限性也十分明显。一方面, 对观测角度和观测区域有很强的限制, 无法保证最佳观测角度和观测模式, 影响观测精度; 另一方面, 观测空间易出现视线遮挡, 对障碍避让、目标跟踪等功能实现有很强的限制, 影响系统的灵活性。

1985 年 Bajcsy<sup>[10]</sup>相对于被动视觉提出了主动视觉的概念, 其数据获取特性和参数可以由场景解释系统部分或全部动态地控制, 因而在提高系统的精度和灵活性方面有着本质的优越性。主动视觉系统正越来越受到广大研究人员的关注, 许多实验室建立了主动视觉系统的实验装置, 并研究了相关的计算理论与

算法。

K. Pahlavan<sup>[11]</sup>等人开发的 KTH 机器头是第一个可以为视觉任务提供合理性能和精度的主动视觉系统。它的两个摄像机均有两个自由度的独立定向能力,整个系统绑定在一个 2 自由度的颈项上,可以实现平转和倾斜,运动性能远远超过人眼。美国 Vanderbilt 大学研制的 CATCH 头眼系统<sup>[12]</sup>表明,多目系统为立体三维重建时对应点匹配提供了有利条件。此后,类似的双目主动视觉结构受到了国内外学者的极大关注,他们设计了各种构型的样机。同时,在主动视觉理论方面也取得了一些进展: D. H. Ballard<sup>[13]</sup>研究了仿人主动视觉系统构造和跟踪算法; Y. Nakabo 等人<sup>[14]</sup>模仿生物视觉行为研究了头眼协调系统的高速仿生控制方法; M. Okutomi 等人<sup>[15]</sup>建立了变基线主动视觉系统多图像对间的立体匹配方法; T. S. Huang<sup>[16]</sup>提出了通过相关特征点估计刚体运动和结构的算法; S. D. Blostein<sup>[17]</sup>研究了主动立体视觉定位的精度问题; J. Batista<sup>[18]</sup>、X. Roca<sup>[19]</sup>、A. Dankers<sup>[20]</sup>、C. Brown<sup>[21]</sup>、E. Rivlin 等人<sup>[22]</sup>研究了双目主动视觉中聚焦、凝视、扫视、追踪等仿生视觉行为的理论模型,讨论了双目视觉系统下的最佳观测模式,为精确观测、三维还原、双目协调等技术奠定了基础; N. J. Cowan 等人<sup>[23]</sup>建立了双目主动视域下的导航函数,用于对环境中障碍物的检测,提出了障碍物避让的伺服策略; M. Asada 等人<sup>[24]</sup>利用双目自适应视觉伺服实现了独立移动目标的视觉跟踪; A. Hauck 等人<sup>[25]</sup>模仿人接近和抓取物体的过程,利用手眼系统实现了串联机器人的导航和抓取实验; C. Tomasi 等人<sup>[26]</sup>研究了基于目标点检测的视觉跟踪方法; J. A. Piepmeyer 等人<sup>[27]</sup>将模型预测控制 (MPC) 引入视觉系统控制,提出了基于 MPC 的跟踪策略; T. Bandyopadhyay 等人<sup>[28]</sup>研究了在有障碍物环境下障碍间跟踪 3D 靶的运动规划问题。主动视觉机构和相关的理论不断发展,极大地促进了主动视觉系统在监控、机器人等领域的应用。

在国内,主动视觉技术也逐渐得到了应用。如浙江大学机械系<sup>[29]</sup>完全利用透视成像原理,采用双目立体视觉方法实现了对多自由度机械装置的动态、精确位姿检测,仅需从两幅对应图像中抽取必要的特征点的三维坐标即可,信息量少,处理速度快,尤其适用于动态情况;华中科技大学李明富等人<sup>[30]</sup>提出一种基于双目视差和主动轮廓的机器人手眼协调技术,该方法利用主动轮廓的思想动态地逼近和跟踪机器人及目标物体的外部轮廓,通过控制双目视差趋零来实现机器人靠近目标和抓取物体;中科院自动化所吴福朝等人<sup>[31]</sup>提出了一种新的基于主动视觉系统的摄像机自定标方法;哈工大<sup>[32]</sup>采用异构双目活动视觉系统实现了全自主足球机器人导航,将一个固定摄像机和一个可以水平旋转的摄像机,分别安装在机器人的顶部和中下部,可以同时监视不同方位的视点,体现出比人类视觉优越的一面。

由上可见,主动视觉技术与机器人技术的结合,在机器人运动准确性、智

能性提高方面的优势已经凸显出来。但纵观主动立体视觉现有的理论和技术水平,仍有一些理论问题亟待解决:

(1) 视觉系统平台及运动控制问题 双目主动立体视觉系统的运动机构设计及运动控制驱动器设计中需要考虑两方面的问题:一方面是如何使视觉系统的每一个自由度的运动具有运动平稳、低噪声、可控性强、定位精度高等特点,另一方面还需要考虑整个运动控制系统的性价比。

(2) 视觉分析问题 视觉分析是视觉系统的核心问题,尤其是在运动目标检测、识别与跟踪方面还有待进一步的研究,问题主要集中在简化视觉计算模型,降低计算复杂性,达到实时性、准确性要求等问题上。

(3) 双目协调控制问题 同被动视觉系统相比,主动视觉系统的优势在于通过运动控制单元可以协调两摄像机的姿态,但如何实现像人眼那样自主协调双目,在满足视觉计算模型的约束的同时,获得最佳的观测角度和观测模式,实现视觉分析与运动控制的一致,这是主动视觉的另一个核心问题。

### 1.2.2 主动视觉机构构型

双目主动视觉系统根据双目间的基线可调性分为基线固定和基线可调两种类型。基线固定的双目主动视觉机构主要以仿灵长类动物双目视觉系统为主,尽可能匹配人类视觉系统的特征。从双目可以灵活调整出发,研究人员试图将摄像机安装在一些导轨上,以实现在一定区域内多方位、多视角观测目标,从而构成基线可调的双目主动视觉系统。典型的结构如图 1-7 所示。其中,图 1-7a 所示为 Gosselin 等人<sup>[33-35]</sup>研制的双目主动视觉灵巧眼 ASP (Agile Stereo Pair),这是一个双目可在直线导轨上精确移动的视觉机构,其基线长度可以调整,但基线仅限于在直线方向上平移。实验表明,动态基线调整特性的采用没有明显的精度损失,反而可以调整两个光轴间夹角,获得好的观测效果,有利于实现高速定位和光滑跟踪等视觉行为。图 1-7b 所示为中国科学院自动化研究所赵晓光等人<sup>[36-38]</sup>建立的一种双目立体视觉监控装置(专利号为 200420077838.5),两台摄像机安装在相互垂直的导轨上,系统的基线不仅长度可调,而且位置和方向也在一定的范围内可调,但视角可调范围有限。图 1-7c 所示为燕山大学的孔令富<sup>[39-41]</sup>教授提出的基于圆形导轨(下面简称圆轨)的双目主动视觉机构,承载摄像机的装置有 3 个自由度,其中 2 个自由度用于调整摄像机的姿态,1 个自由度用于控制摄像机在圆轨上滑动,调整两摄像机的位置。该视觉机构的基线不仅长度、位置、方向均可调,而且在环域内具有 360° 全视角。因此,基线可调的双目主动视觉机构打破了基线固定的仿人眼的双目配置,是一种超生物体的机器视觉新构型。

有别于图 1-7a、b 所示的两种视觉机构,图 1-7c 所示的这种基于圆轨的基

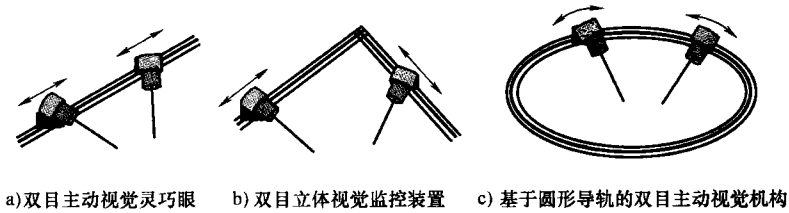


图 1-7 基线可调的双目主动视觉系统示意图

线可调视觉机构具有以下特点：

1) 两摄像机在圆轨上独立可调，引起基线长度和位置的变化，动态形成双目立体视觉结构，一方面保证摄像机的视域覆盖整个监视区域，另一方面增加观测角度调节的灵活性，实现工作空间的全视角监测。

2) 通过协调摄像机的位姿，能满足最佳观测模式的正视、合适的光轴间夹角等要求，有利于提高监测精度。

3) 增加对空间目标及环境的适应性，便于处理视觉遮挡、障碍避让、运动跟踪等深入应用。

可见，图 1-7c 所示的基于圆轨的视觉机构涵盖并极大地扩展了图 1-7a、b 所示的两种结构的视觉行为能力，可以看成是基线可调双目主动视觉系统最具代表性的解释模型。因此，对这种机构模型的视觉分析、双目协调控制和视觉行为理论的研究，对各种构型的基线可调视觉系统都有代表性和示范性。

## 1.3 并联机器人视觉技术

### 1.3.1 并联机器人的视觉需求

研究具有人类视觉、力觉、听觉、触觉、滑动觉、接近觉等各种感觉，特别是具有智能性的机器人，既具有普遍意义和广阔的应用前景，也是人类研究机器人的最终目标。随着并联机器人应用领域的扩展，对其性能等各方面指标的要求也越来越高。事实上，在并联机器人进一步实用化和商业化的进程中还存在若干有待解决的问题：

(1) 关于机构精度、机器人运动精度的标定问题 首先，并联机构的杆件和铰链的制造、装配以及校准（如铰链中心点的准确几何位置）误差，会对整机呈现非线性影响；其次，机器人在不同位姿承受不同方向的载荷，也会对机器人运动精度产生影响；再者，控制中的非线性误差也会影响并联机器人末端执行器的定位精度。如何降低这些误差对执行器定位精度的影响是一个关键的技术问题。

(2) 机器人“盲”工作状态问题 即并联机器人在规划好的轨迹上按指定的方式工作,但对其末端执行器的实际位姿和操作对象的状态、工作环境中其他对象的存在和变化缺乏主动的认知能力。就如同盲人在其已知的环境下能够不出错的工作,但当环境中的对象发生变化时,就无法正常工作了。因此要提高机器人对环境的认知能力。

上述问题的解决势必要对并联机器人运动副、末端执行器,操作对象的空间位姿等进行观测。除了传统的通过专用传感器的方法外,一个很有前景的研究方法就是通过视觉技术对机器人的运动机构、工作环境进行观测,运用视觉计算理论求解出观测目标的空间位姿,从而实现并联机器人的运动标定、视觉伺服,提高对环境的认知能力,进而提高机器人的运动规划和控制的智能性。

### 1.3.2 几种典型的并联机器人视觉系统

目前,由于并联机器人视觉技术的研究处于初创阶段,所以,多数情况下,并联机器人处于“盲”工作状态。鉴于此,一些学者针对并联机器人的机构特点提出了其视觉系统解决方案。

P. Renaud 等人<sup>[42-46]</sup>提出了用单摄像机对 H4 并联机构进行标定的方法,如图 1-8 所示。他们将一台 CCD 摄像机固定于并联机构的基座上,观察并联机构的腿和连接末端执行器的活动平台,通过观察推断末端执行器的位姿来实现标定。

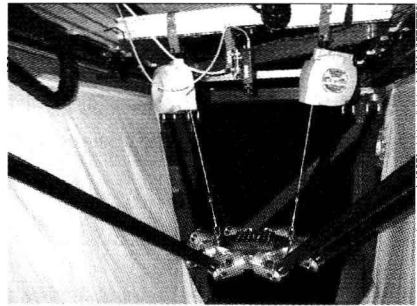


图 1-8 P. Renaud 设计的 H4 并联机构单摄像机视觉监测机构

但这种标定方法有其自身的缺点,首先,由一台摄像机构成的视觉系统,无法通过一幅监测图像获得深度信息,必须通过连续两幅以上的图像才能确定,这样在

两幅图像的采样周期内由于运动将引起目标点的定位误差;其次,该方法虽然可以间接得到末端执行器的空间位姿,但无法获得工作空间的环境信息,限制了视觉信息的深入应用。

N. Andreff 等人<sup>[47-49]</sup>利用单摄像机对 Gough-Stewart 并联机器人腿部运动图像的变化作为反馈信息,设计了基于图像 Jacobian 矩阵的伺服控制器,如图 1-9 所示。但这种方法由于视觉系统过于简单,并且仍然局限于对腿而不是对末端执行器和工作空间的观察,无法实现跟踪、避障等操作。

另一类并联机构视觉方案是由 ABB 公司为其 IRB 340 FlexPicker 并联机构设计的视觉监测机构<sup>[50]</sup>,用于搬运和装配机器人的视觉监测和导航,如图 1-10 所示。这类监测机构的特点在于:双摄像机固定安装在并联机构的支链(腿)上,



由此可以观察并联机构的工作空间；典型的手眼系统。它的视觉机构存在如下问题：摄像机随支链（腿）运动；该方法未给出动态标定的方法，摄像机的位姿难以确定。

总体来看，前述并联机器人的视觉系统大都采取被动视觉或基于串联机构的手眼系统来提供视觉信息，观测范围仅限于部分工作空间，存在视觉遮挡和视觉盲区，难以实现对操作部件的精确定位和视觉跟踪等功能。要克服目前并联机器人视觉系统的瓶颈，必须从视觉系统的主动性和与并联机构相协调上寻求突破。

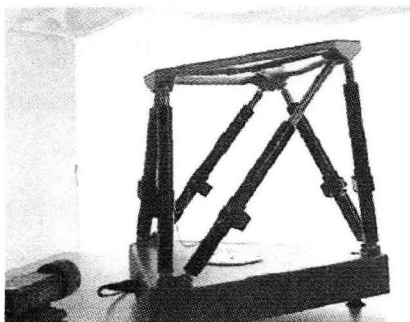


图 1-9 N. Andreff 设计的并联机构腿部视觉监测机构



图 1-10 IRB 340 FlexPicker 加装在腿部的视觉监测机构

### 1.3.3 并联机器人双目主动视觉监测平台

针对并联机器人的机构多链并行性和工作空间局部性的特点，从克服视觉遮挡和灵活改变观测视角的着眼点出发，在基于圆形导轨的双目主动视觉机构构型的基础上，本书提出了两种并联机器人双目主动视觉监测平台的全新设计方案。

如图 1-11 所示，方案 1 为独立于并联机器人的双目主动视觉监测平台设计。视觉监测平台为圆轨上的双链结构，圆轨圆域中心区为并联机器人工作空间。各支链由圆轨小车、丝杠、云台、摄像机构成一个串联机构。两支链摄像机在机构的驱动下可以灵活调整观测的视角，动态形成双目立体观测模式，获得全面的机器人运动和加工状态的图像信息，实现对目标的监测。

如图 1-12 所示，方案 2 为连于并联机器人活动平台的双目主动视觉监测平台设计。将圆形导轨固连于活动平台，两个滑块可沿导轨移动，云台安装在滑块上，摄像机置于云台上。通过滑块的移动和云台的平转和俯仰调整摄像机的位置和姿态，实现对并联机器人操作部件和加工目标的同步监测。

两方案的共同特征：均采用圆轨结构上的双链结构，两支链独立控制，动