

分类号: _____

密级: _____

U D C: _____

编号: _____

工学硕士学位论文

焊接机器人主动视觉手眼标定研究

硕 士 研 究 生：王武升

指 导 教 师：陈虹丽 教授

学 科、专 业：检测技术与自动化装置

论 文 主 审 人：付斌 副教授

哈尔滨工程大学

2013 年 6 月

分类号：_____

密级：_____

U D C：_____

编号：_____

工学硕士学位论文

焊接机器人主动视觉手眼标定研究

硕 士 研 究 生：王武升

指 导 教 师：陈虹丽 教授

学 位 级 别：工学硕士

学 科 、 专 业：检测技术与自动化装置

所 在 单 位：自动化学院

论文提交日期：2013 年 04 月 18 日

论文答辩日期：2013 年 06 月 07 日

学位授予单位：哈尔滨工程大学

U.D.C:

A Dissertation for the Degree of M.Eng

Hand-Eye Calibration Research for Welding Robot Based on Active Vision

Candidate: Wang Wusheng

Supervisor: Prof.Chen Hongli

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality: Detection Technology and Automatic Equipment

Date of Submission: Apr.18,2013

Date of Oral Examination: Jun.7,2013

University: Harbin Engineering University

哈尔滨工程大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）：

日期： 年 月 日

哈尔滨工程大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解学校保护知识产权的有关规定，即研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于哈尔滨工程大学。哈尔滨工程大学有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件。本人允许哈尔滨工程大学将论文的部分或全部内容编入有关数据库进行检索，可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文，可以公布论文的全部内容。同时本人保证毕业后结合学位论文研究课题再撰写的论文一律注明作者第一署名为哈尔滨工程大学。涉密学位论文待解密后适用本声明。

本论文（☐在授予学位后即可 ☐在授予学位 12 个月后 ☐解密后）由哈尔滨工程大学送交有关部门进行保存、汇编等。

作者（签字）：

导师（签字）：

日期： 年 月 日

年 月 日

摘 要

视觉作为机器人智能化最重要的手段之一，运用到焊接机器人中，可以大幅提高焊接机器人的工作效率和工作精度。其中，手眼标定实现了摄像机坐标系与机械手坐标系的空间转换，其标定结果对焊接机器人的工作精度有着直接的影响。鉴于目前手眼标定都是在特定的机械模型下完成的，文中讨论一种普遍适用于工业焊接领域的手眼标定方法，主要进行了以下工作：

首先，研究并讨论了主动视觉系统的硬件框架及所需的器件，针对本文的应用背景，研究并讨论了主动视觉系统组成器件的重要技术指标，在此基础上选择合适的器件，并搭建了单目结构光视觉测量系统和圆柱型焊接机器人测试平台。

其次，对已有的摄像机标定方法进行了分类与研究，并重点讨论了经典的张氏标定法；分析了单目结构光系统测量原理，并对其进行了定量建模；根据“消隐点”的思想，提出了一种改进的主动视觉系统内参数标定方法，仅用一次标定即可同时得出摄像机参数和单目结构光系统参数，并利用最小二乘法对标定实验数据进行了优化处理。利用已搭建的圆柱型焊接机器人测试平台，对改进的主动视觉系统内参数标定方法进行了实验，实验结果表明，对比原有方法，该方法缩短了内参数标定时间，同时标定精度达到了工业标准。

再次，对常用的手眼标定方法进行了深入研究，对其一般性步骤进行了总结，并提出了提高精度的方法；在总结前人的标定方法之后，提出了一种手眼标定方法，该标定方法采用参数分析的方式，分别对旋转矩阵和平移向量进行了标定。该标定方法不需要使用特定的标定物，利用空间中的特征点即可确定摄像机移动前后的对应关系，快速有效的实现了旋转矩阵的标定；利用虚拟坐标系确定摄像机与机械手的对应关系，实现了平移向量的标定。

最后，针对文中提出的主动视觉系统手眼标定方法，在圆柱型焊接机器人上进行了跟踪实验，实验结果表明了此种标定方法的稳定性与准确性。

关键词：单目结构光；主动视觉；手眼标定；焊接机器人

ABSTRACT

Vision as one of the most important means in robot intellectualization, applied to welded robot can improve the efficiency and precision in significant measure. Where, the hand-eye achieved the transition between the camera coordinate and the manipulator coordinate, and the calibration result will have influence on the work precision of robot directly. Seeing that the hand-eye calibration is accomplished based on specific mechanical model so far. So, in this study, a hand-eye calibration method which is widely used in industrial welding field is presented.

First, the framework of hardware and the necessary devices of the active vision system are analyzed. And, according to the applied background the main technical data of the devices which comprise the active vision system is studied, under this condition the suitable devices is chose, then a monocular structured light vision measurement system and cylindrical type welding robot test platform is built successfully.

Second, previous camera calibration methods are classified and studied, in which the Zhang calibration method is specialized. The measurement principle of monocular structured optical system is analyzed and modeled. According to the idea of “vanish points”, an improved calibration method of inside parameters of active vision system is presented, which uses the Least square method to optimize the calibration data effectively, and can get the camera parameters and monocular structured optical system’s parameters at the same time after only one calibration. To verify the practicality of this method, a simulation is achieved on the cylindrical type welding robot test platform. The simulation result indicated that, compared with the previous method, this method reduce the calibration time of inside parameters, and the calibration accuracy has reached the industry standard at the same time.

Third, intensive study the conventional hand-eye calibration methods, and conclude the procedure of them. Then a improved hand-eye calibration method is proposed based on a conclusion of the previous calibration methods. The improved method calibrates the rotation matrix and translation vector respectively based on the parameter analysis method. It need not the specific calibration object, and can achieved the calibration of rotation matrix swiftly and effectively utilizes the characteristic points to determine the relationship between the camera moves fore and after. At the same time the translation vector can be calibrated according to the relationship between camera and manipulator determined by virtual coordinate.

Finally, to verify the proposed the hand-eye calibration method of active vision system, the tracked test is done. The result shows that this is a stable and accurate method.

Keywords: Monocular structured light; Active vision; Hand-eye calibration; Welding robot

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 手眼标定技术的研究背景和意义	1
1.2 手眼标定技术的发展与现状	2
1.3 手眼系统的研究与介绍	3
1.3.1 主动视觉技术	3
1.3.2 手眼系统	3
1.4 本文主要内容及章节安排	4
第 2 章 主动视觉系统硬件构成的研究	6
2.1 主动视觉系统的光源研究	6
2.2 主动视觉系统的镜头研究	9
2.3 主动视觉系统的摄像机研究	11
2.4 DH-VT140 图像采集卡介绍	12
2.5 IPC-610-L 工控机介绍	12
2.6 主动视觉系统器件选取及实物搭建	13
2.6.1 主动视觉系统器件选取	13
2.6.2 主动视觉系统实物搭建	13
2.7 本章小结	14
第 3 章 主动视觉系统内参数标定	15
3.1 常用坐标系	15
3.2 摄像机模型分类与研究	17
3.2.1 线性模型	17
3.2.2 非线性模型	18
3.3 摄像机标定研究	19
3.3.1 摄像机标定分类	19
3.3.2 基于 2D 平面靶的摄像机标定	20
3.4 单目结构光系统定量建模与测量	23
3.5 单目结构光系统标定研究	23
3.5.1 消隐点	24
3.5.2 基于“消隐点”的结构光标定方法	24
3.6 改进的主动视觉系统内参数标定方法	25
3.7 主动视觉系统内参数标定实验及误差分析	27
3.7.1 主动视觉系统内参数标定实验	27

3.7.2 误差分析	29
3.8 本章小结	30
第 4 章 主动视觉系统手眼标定	31
4.1 空间描述与变换	31
4.1.1 空间描述	31
4.1.2 空间变换	33
4.2 建立手眼关系的基本方程	35
4.3 常用的手眼标定方法研究	37
4.4 参数分离的手眼标定方法	39
4.4.1 摄像机运动方向的确定	39
4.4.2 旋转矩阵的标定	40
4.4.3 平移向量的标定	42
4.4.4 手眼标定过程描述	43
4.5 参数分离的手眼标定方法性能分析与研究	43
4.5.1 参数分离的手眼标定方法性能分析	43
4.5.2 平移向量 B 求法的研究	44
4.6 本章小结	46
第 5 章 主动视觉系统手眼标定实验	47
5.1 手眼标定实验的实验设备与计算环境	47
5.2 手眼标定实验的实验过程与实验结果	49
5.2.1 旋转矩阵的实验与计算	49
5.2.2 平移向量的实验与计算	52
5.3 实验数据分析	54
5.3.1 准确性分析	54
5.3.2 误差分析	55
5.4 本章小结	56
结 论	57
参考文献	59
攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果	63
致 谢	64

第 1 章 绪论

1.1 手眼标定技术的研究背景和意义

世界上第一台机器人问世于 20 世纪 60 年代，它的出现使得科学家的许多“想法”成为可能，因此机器人受到了许许多多的关注，这也促进了机器人不断的发展与完善^[1]。现如今，机器人的智能化程度决定了一个国家的自动化水平，与国家的经济发展密切相关，因而也驱使了国家投入大量的科研经费，可见发展智能化机器人事业是一项十分有意义的事情。

人类依靠视觉、听觉、味觉、嗅觉、触觉来感知外界的环境，其中最重要最直观的莫过于视觉，视觉给我们提供了最为丰富、形象的外界信息，使我们能更容易的与外界的环境进行交流。同样的，如果能将人的这种视觉能力应用到机器人中，使其拥有能与外界环境互动的能力，这无疑会极大的拓展机器人的智能化程度，使机器人能更好的满足人类的需求^[2-3]。机器人与人类有所不同，人类有一个全自动的大脑，而机器人的大脑是由电脑组成的，因而对于机器人的这种视觉，我们应包括前期的外界环境获取与传输、中期的信息处理与存储及后期的理解与操作等三个过程。我们研究机器视觉，最终是为了让机器人能够跟人类一样通过观察去认知周围环境，并且能对环境进行“描述”，进而将信息进行存储、识别与处理^[4]。

视觉的机器人能从一幅或者几幅图像中去感知周围环境、并控制自身进行对应的操作，这是我们所期望的^[5]。机器人模拟人类从观察到手操作的这种行为，是建立在机器人已知从视觉传感器到操作行为的映射的基础上的。这中间量化视觉传感器坐标系与机器人坐标系的映射关系的过程，就是本文研究的对象：手眼标定。手眼标定一经提出便受到了广大研究者的关注，并且迅速发展成为一个相对独立的研究领域，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。如何能使手眼标定方法简单、通用又不失准确性，一直驱使着无数手眼标定研究者的不断前进。

作为一个现代化的工业大国，焊接一直处于举足轻重的位置，如果能将机器人视觉技术与焊接工业结合到一起，这不仅促进了我国智能化机器人事业的发展，同时也推动了我国经济的进一步提高，可见研究焊接机器人视觉技术有着实际的运用背景与意义。传统的焊接一般都是由人力完成，这大大限制了焊接效率和焊接精度。随着开环焊接设备的引入，出现了离线编程和示教再现的焊接方式，仅需要少量工人对所要完成的加工任务进行远程控制或路径规划，机器人就可以按照规划好的路径自动的进行焊接，如果加工的任务与待加工的工件均不变，机器人可根据已规划好的路径重复进行焊接。但是当待加工的工件摆放不同或者其他外部环境发生变化时，需要工作人员进行重新计算

给出运动轨迹，并重新编程调节，对于加工小批量的工件尤为不实用。主动视觉拥有对外界信息获取的主动性和视觉信息处理的选择性，将其添加到开环焊接设备中，正好弥补了开环系统无偏差反馈的缺陷。我们将主动视觉下得到的图像信息进行反馈，形成一个基于位置反馈的闭环，帮助实现实时的路径规划与修正。主动视觉焊接机器人较开环焊接机器人最大的优点是不需要人工规划路径，这不仅提高了焊接的效率，也提高了焊接的灵活性^[6]。对于主动视觉焊接机器人，手眼标定的准确性直接影响了此类机器人焊接的有效性，手眼标定的精确性直接影响了此类机器人焊接反馈的精准度，手眼标定的复杂性直接影响了此类机器人标定的快速性。可见，研究主动视觉手眼标定在焊接领域中的应用是一项非常有实用价值的课题，同时也是一项难度较大，非常具有挑战性的课题。

1.2 手眼标定技术的发展与现状

机器人的手眼标定与摄像机技术有着紧密的联系，二者都是随着机器视觉的快速发展而出现的。手眼系统首先出现于 1973 年，当时 Shirai 与 Inoue 为了提高机器人的控制精度，于是将视觉系统运用到机器人上^[7]，这是最早的手眼系统应用。在那个时期，绝大多数视觉系统都是以开环形式融合到机器人中的，例如电子装配、集成电路生产、饮料灌装检验等等，手眼标定在当时也就是简单粗糙的机械定位。在最初的几年里，手眼标定由于当时条件所限，发展比较缓慢，直到 80 年代末期，基于视觉反馈的闭环机器人^[8]的出现改变了这一局面，闭环机器人的出现使人们对反馈控制充满想象，同时得益于当时科技的进步，出现了专门的图像处理硬件，使人们萌生了使用图像进行位置反馈的想法。仅到 90 年代初，人们就提出了许多成功的手眼标定方法，导弹跟踪摄像系统、自动驾驶系统及自动焊接系统等各种应用系统也纷纷出现^[9]。直到现在，手眼标定仍然吸引着许许多多研究者的关注，机器视觉因此也得到了长足的发展。

近年来，随着手眼标定技术的发展成型，可将其分为两大类，即传统的手眼标定方法和自标定方法^[10]。传统的手眼标定方法有他标志的特点，即需要使用标定参照物，它的一般性思路是：在选定的摄像机模型下，根据摄像机拍摄的图像与实际的标定参照物进行对比，利用一些已知的限制条件作为桥梁，从而求出整个系统的结构参数。传统的摄像机标定方法有着较高的精度，可靠性也很强，但却并不是通用的。在实际的应用中，经常会遇到无法放置标定参照物或者频繁需要调整摄像机的情况，此时传统标定方法就无法满足要求，这就促使了自标定方法的出现。自标定方法不需要使用已知的标定参照物，它的一般性思路是：控制摄像机在空间中运动，并对运动前后摄像机视野内的环境进行拍摄，根据所拍图像之间的对应关系作为桥梁，从而对视觉系统的手眼关系进行标定。此类方法也有不少问题，如解的不唯一、不稳定和鲁棒性差等。正因为手眼关系的精确标定比较困难，不少研究者试图绕开这一难题，不经过标定对视觉系统进行直接控

制，即无标定手眼协调，也取得了很多不错的成绩^[11-14]。

1.3 手眼系统的研究与介绍

1.3.1 主动视觉技术

本文所说的主动视觉是指通过外界辅助光源，提供给图像一些特殊的信息，摄像机可以采集到这些夹杂着特殊信息的图像。与被动视觉相比，主动视觉更加具有灵活性与可选择性，我们可以将有用的信息进行放大，类似的，可以将干扰进行缩小，因为主动视觉的这种优越性，给机器人与环境的交互提供了强有力的支持。单目结构光即是主动视觉方式的一种。

1.3.2 手眼系统

安装有摄像机的机械就可成为一个手眼系统。常用的手眼系统可分为眼固定（Eye-to-Hand）和眼在手上（Eye-in-Hand）两种类型^[15]，这是根据摄像机安装的方式不同进行区分的，他们的模型如图 1.1 所示。

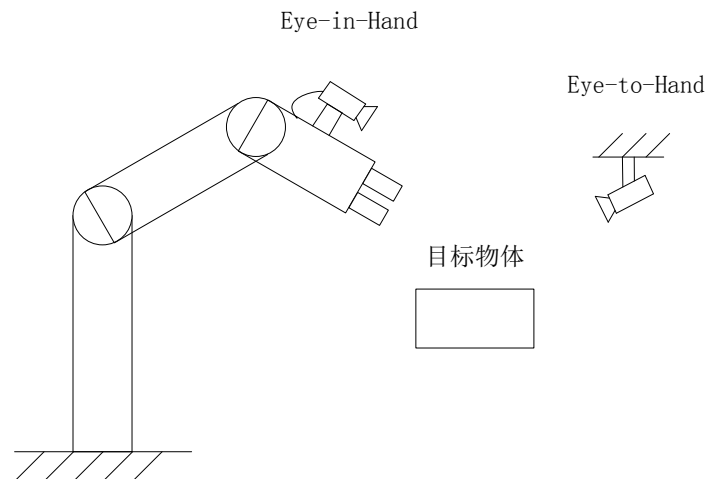


图 1.1 两种手眼系统的示意图

（1）眼固定型（Eye-to-Hand）

从图 1.1 中可以看出，眼固定型这种类型的摄像机与机器人是分离的，摄像机固定安装在某个位置，时时的监测机器人的运动及当前位置，通过反馈目标物体与机器人执行器末端之间的偏差，驱动机器人进行相应的操作，实现末端执行器与目标物体的互动。这类模型最大的优点在于可以观测全局的环境，因此在移动式机器人领域中得到了较为广泛的应用。同时他的缺点也是比较明显的，当机器人运动到目标图像与摄像机之间时，这时候会产生图像遮盖现象，摄像机无法得到图像也就无法反馈有用的特征信息。因此，对于完全依靠图像反馈进行控制的系统不适合使用这种安装方式。

(2) 眼在手上型 (Eye-in-Hand)

从图 1.1 中可以看出, 眼在手上型这种类型的摄像机与机器人是一体的, 摄像机固定安装在机器人上, 实时的观测摄像机当前视野内的特征图像, 提供给机器人下一步要运动的控制量。这类模型较之眼固定型最大的优点在于不会产生图像遮盖, 因而比较适合基于图像反馈的控制系统使用。当然这种类型也有缺点, 其中比较严重的一点就是在机器人运动过程中会带动摄像机一起运动, 这种连带的运动很可能使目标超出摄像机的视野, 机器人将无法得到正确的控制量。

考虑到本文的应用背景, 焊接工作需要实时的进行, 绝对不允许出现图像遮盖等现象。同时摄像机跟随机器人一起运动可以获得更为清晰的焊缝图像, 能有效的提高焊接的精度。故而本文选用 Eye-in-Hand 这种摄像机安装方式, 并对其手眼标定技术进行研究。

1.4 本文主要内容及章节安排

本文的研究来源于“马鞍形视觉跟踪焊接机器人”项目, 项目目标为: 机器人通过单摄像机反馈回的图像信息自动的进行轨迹规划, 完成任意曲面的跟踪。从直观意义上讲, 要实现任意曲面的跟踪即要实现:

(1) 对空间的特征点进行采集, 将有用的位置信息记录到图像当中。从图像中获取特征点的位置信息, 也就是特征点在图像中的二维坐标。并实现从二维图像坐标到三维摄像机坐标的转换。

(2) 通过手眼标定确定手眼关系后, 将从第一步获取的三维摄像机坐标进一步转换为世界坐标, 实现对特征点的准确定位。

(3) 结合各个特征点的世界坐标进行实时的轨迹规划, 通过控制器驱动机械手准确的进行跟踪。

本文针对如何实现从视觉的二维图像到三维坐标的转换、视觉传感器坐标系与机器人坐标系(世界坐标系)的映射关系等进行了研究, 对于研究中遇到的问题也进行了分析讨论。具体内容安排如下:

第 1 章, 从根源上出发, 讲述了本文选题的背景和意义, 介绍了手眼标定技术的发展与现状, 并给出了本文的各章节内容安排。

第 2 章, 对主动视觉系统的硬件框架进行了研究, 并对系统所需的各个器件的技术指标进行了分析, 在此基础上完成了器件的选取, 最后搭建了单目结构光视觉测量系统和圆柱型焊接机器人测试平台, 并对其模型进行了定性分析。

第 3 章, 重点讨论视觉系统内参数的标定。首先, 对一些基础性的知识与定义进行了介绍, 具体包括常用坐标系的定义, 摄像机的模型。然后, 对摄像机标定与单目结构光系统标定分别进行了研究, 深入讨论了经典的张氏标定方法。最后, 在总结分析两种

标定方法的基础上,给出了改进的主动视觉系统内参数标定方法,实现了从二维图像坐标到三维摄像机坐标的一一对应。最后对改进的内参数标定方法进行了具体实验与误差分析。

第4章,是本文的重点章节,主要讨论了视觉机器人手眼标定技术。首先,给出了坐标系间空间描述、空间变换的方法,在此基础上研究了如何建立手眼关系基础方程。然后,对常用的手眼标定方法进行了研究,总结了手眼标定的具体操作过程,并对其性能进行了分析。最后,提出了一种手眼标定方法,给出了这种手眼标定方法的理论推导,详细分析了这种标定方法的性能,并对这种手眼标定方法的改进方案进行了讨论。

第5章,对第4章提出的手眼标定方法进行了具体实验。首先对实验环境与设备进行了必要的介绍,然后对手眼关系的旋转矩阵与平移向量分别进行了实验,详细介绍了每一步的操作并记录下实验得出的数据,并给出了标定结果。最后,对实验过程中记录下的数据进行了分析研究,证明了文中提出的手眼标定算法的准确性。

第 2 章 主动视觉系统硬件构成的研究

主动视觉系统的硬件构成大体上可分为三部分内容：图像获取、图像分析处理及图像结果显示与控制^[16]。可以将其按功能进行进一步细分，如图 2.1 所示。

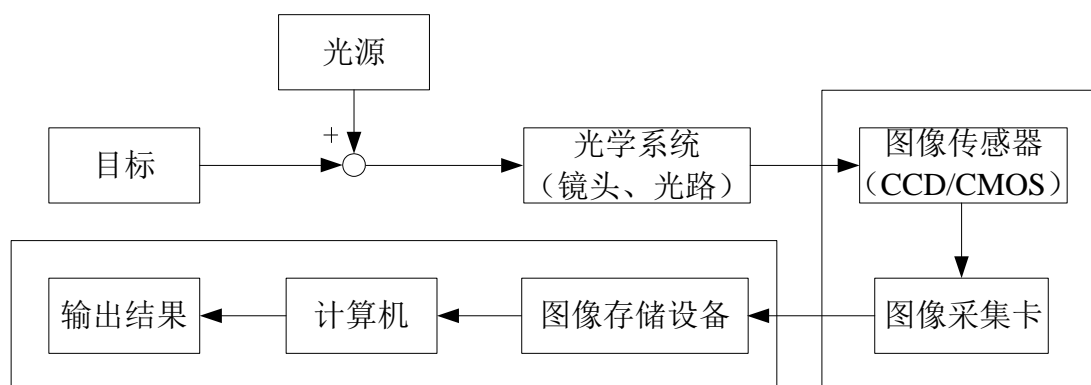


图 2.1 主动视觉系统的硬件构成

如图 2.1 所示，为搭建本文主动视觉系统，将对光源、镜头、视觉传感器（CCD 相机）、图像采集卡以及工控机等进行讨论选取。其中光源为系统提供特征线条；镜头将被测场景中的目标物体及其特征信息成像到 CCD 相机的成像面上；图像采集卡实现将 CCD 相机中的电信号图像转变为计算机可用的数字图像并存储；工控机完成对图像的存储、处理及后续的显示、控制等操作。

2.1 主动视觉系统的光源研究

主动视觉系统是要依赖外界主动施加干预的，辅助光源就是施加主动干预的主要方法之一。光源照射到目标物体上，可以增加感兴趣区域的对比度，这方便了摄像机提取特征信息，因而光源在主动视觉系统中应用比较广泛。然而光源的添加也是有选择性的，合适的光源可以突出目标物体的特征信息，并降低周围环境的干扰，为后期的图像处理赢得便利。相反的，不合适的光源会给整个系统带来诸多不便，例如光源亮度太高，会使得图像模糊并因此掩盖特征信息；光源亮度不集中，会产生带有厚度的虚边，给边缘检测带来困难；光源的照射不均匀，会使得图像难以使用阈值分割的处理方法。因此，光源应该根据视觉系统的现实情况来选择。

一个好的光源应该是在综合分析实验环境与实际所需之后得到的。下面对几种典型的光源进行简单的介绍与说明，并对比分析他们的特点。

（1）前光源

顾名思义，前光源是指光源放在被测物体的前方，如图 2.2 所示，光线直接照射到被测物体上，用以突出被测物体表面的机理。

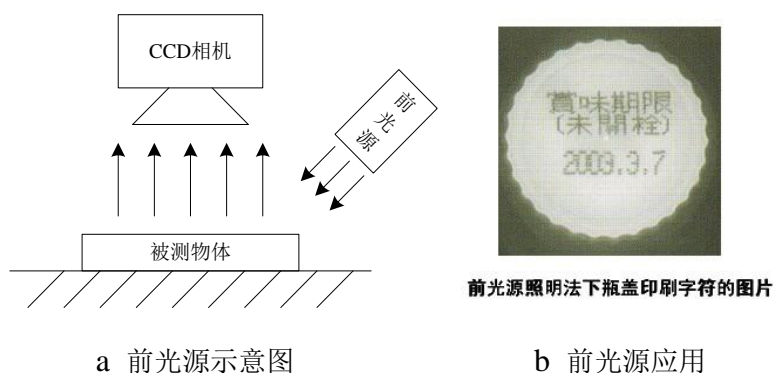


图 2.2 前光源及其效果示图

前光源式可以很好的检测物体反光或物体表面是否平整。如图 2.2b 所示，他可以有效的检测封盖内部或底部的标记、脏污、印刷字等。另外，还可以用于主检测 IC 芯片、电路板、包装袋标记等物体。

(2) 背光源

背光源与前光源刚好相反，如图 2.3 所示，背光源放置于被测物体的背面。这种光源的添加，可以为摄像机充分展示被测物体的边缘轮廓。由于被测物体内部有透光和不透光的部分，当背光源照射被测物体时，不透光的部分将在摄像机中形成阴影，透光的部分相比之下以高对比度的形式成像。因此位于被测物体另一面的摄像机就可以将透光的部分及边缘层次分明的拍摄下来。

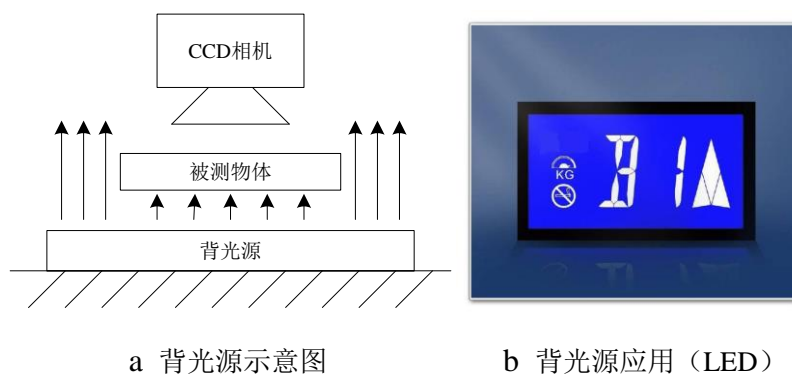


图 2.3 背光源及其应用

如图 2.3b 所示，背光源能很好的突出被测物体的轮廓信息，因此被广泛的运用于 LED 背光技术、轮廓检测等领域。

(3) 环形光源

环形光源能是一种提供大范围均衡照明的光源。在实际应用中，环形光源与 CCD 相机固定安装在一起，并控制使其与相机的镜头同轴，如图 2.4 所示。由于环形光源与摄像机安装在一起，且提供的是范围照明，因而能很好的减少阴影，使图像充分采集被测物体表面的信息。然而要实现无阴影的照明效果，需要对光源与被测物体之间的距离有很好的控制，如果距离选择不当，就会出现本章开头所说的图像模糊或产生虚边等现

象。

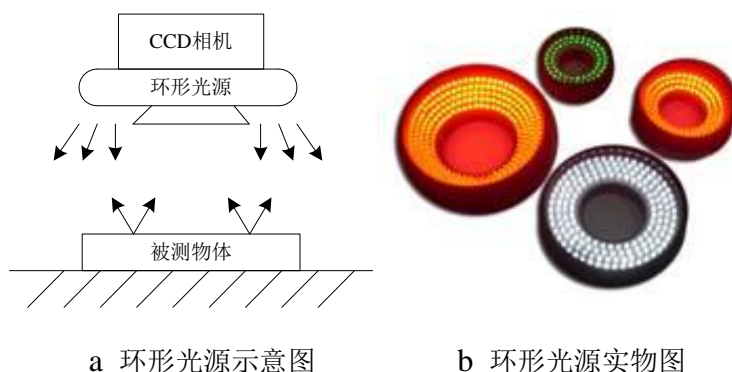


图 2.4 环形光源及其实物

由于环形光源具有去阴影的效果，因此非常适合用于检测高集成度、排列密集的物件。特别的，当被测物体表面为高反射材料时，其检测效果更佳。它广泛应用于有纹理表面的物体测量，如检测各种产品标签、电路板的零件、芯片的印刷字等。

(4) 线光源

线光源能量高度集中，在近距离内，可以使光线集中照射，牢牢汇聚成在一起。线光源可以有效地提高待测物体图像的对比度，使待测物体的特征凸显出来。

一般将线光源安置于工件前方，采用前光源，以一定角度从正面直接对准工件感兴趣的区域，如图 2.5 所示。由于线光源集合了前光源的安装形式，因而继承了前光源的所有优点，同时，线光源亮度集中强度较高，因而采集的图像对比度高，能充分反应被测物体表面的特征。基于以上特点可知，线光源对检测物体反射表面上的阴影、微小缺陷和凹痕十分有效。

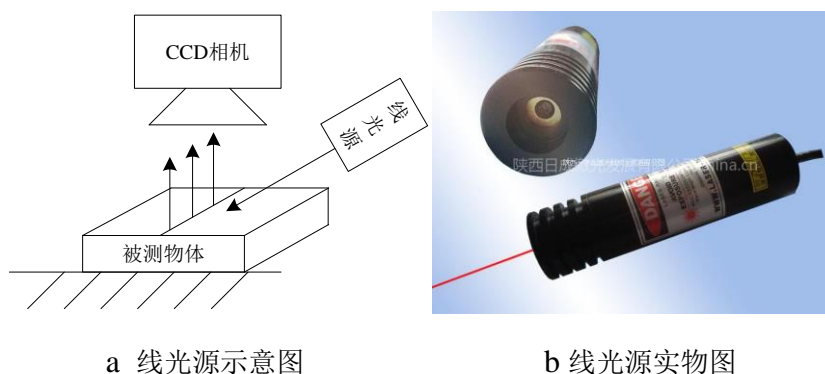


图 2.5 线光源及其实物

本文的研究对象是焊接机器人，跟踪轨迹为马鞍形钢板的空间曲线式焊缝，考虑到线光源用于焊缝凹痕的独特优势，同时线光源价格便宜、稳定性好、容易安装，故选择线光源作为系统的辅助光源。

选择了富镭公司的 FU635AL5-D12，波长为 635nm，供电电压为 DC2.8-5.5 (V)，输出功率为 0.4-5mV，工作电流为 50mA 以内，发射角为 0.5-1.5mrad。

2.2 主动视觉系统的镜头研究

镜头是将外界光线进行集聚，然后投射到 CCD 成像面上，使其产生模拟电信号的物体。光学镜头目前有监控级和工业级两种，监控级镜头主要适用于对于图像质量要求不高、价格较低的应用场合；相反的，对于图像质量要求较高的场合，则需要选用畸变小的工业级镜头，当然他的价格也普遍较高。视场角和焦距是选择镜头时最主要的考虑因素，另外，滤光镜的使用也是镜头技术的重要组成部分。

(1) 视场角

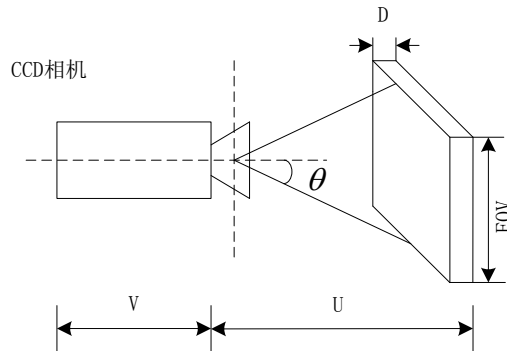


图 2.6 视场角示意图

如图 2.6 所示，图中的 FOV 就是摄像机在当前距离下能观察到的最大范围，称其为视场 (Field of View)，进一步分为水平视场和垂直视场，这是根据摄像机的成像面方向来区分的。由图 2.6 可以看出，根据 CCD 芯片上成像与实际物体的对应关系，可以定义：

$$FOV = L / M \quad (2-1)$$

其中， L 是 CCD 芯片的长 (宽)， M 是放大率，定义：

$$M = h / H = V / U \quad (2-2)$$

其中， h 、 H 分别表示像高和物高； U 、 V 分别表示像距和物距。 FOV 为照射景物的大小。同时 FOV 也可以用视场角 α 来进行表示，如图 2.6 所示，即镜头当前视野内最大的宽度与对应的距离所成的角，定义：

$$\alpha = 2\theta = 2 \arctan(L / 2V) \quad (2-3)$$

由于视场角更加形象且方便计算，故研究人员习惯于使用视场角来定义视场的大小。另外，根据视场大小不同，通常把镜头分为鱼眼镜头、超广角镜头、广角镜头和标准镜头。

(2) 焦距

焦距是镜头及摄像机领域中最重要概念之一，它是这些光学系统中度量光的聚散

度的重要指标。焦距指从透镜中心到 CCD 成像平面的距离，如果是其他形式的成像面，例如底片，亦指透镜中心到底片的距离。

从式 (2-3) 可以看出，镜头的焦距 f 与视场角 α 之间成反比关系。减小焦距 f 会相应的增大视场角 α ，此时可以大范围观测当前距离下的环境，但是由于焦距 f 过小，会导致远处的环境成像不清晰，从而无法观测远距离的环境；增大焦距 f 会相应的减小视场角 α ，视场角变小意味着观察范围也越小，但是带来的好处是很远的物体也能看清楚。另外，从式 (2-3) 可以看出具有大视野范围的短焦距的光学系统聚光能力更强。由此可知，焦距和视场角是一对相互制约的量，在选择一个焦距时也就确定了该焦距下视场角的大小。因此在选择焦距时应根据现实的情况具体分析，充分考虑观测精度与观测范围的取舍，最后才能确定一个合适的焦距。

计算焦距参考如下公式：

$$\alpha = 2 \arctan(SR/2WD) \quad (2-4)$$

$$f = \frac{d}{2 \tan(\alpha/2)} \quad (2-5)$$

其中， SR 为视场大小， WD 为工作距离， d 为 CCD 尺寸。

(3) 自动调焦

由上一小节内容可知，镜头的焦距直接影响了光学测量系统的测量效果与精度，当被测物体在空间中不断的运动时，我们很难选择一个合适的焦距使得观测到的图像保持清晰。当遇上这种情况时，为获得较为清晰的图像，就需要我们对焦距进行不断的调整，使之适合当前的拍摄距离。调焦又可以分为手动调焦和自动调焦，手动调焦由于人为因素的限制，使得调焦的精度较低，费时较长，因而使用的比较少。相反的，自动调焦能很好的弥补手动调焦的缺陷，使用比较广泛。

(4) 滤光镜

滤光镜从外观上看就是简单的一块玻璃片或者塑料片。根据制作的方法和材料不同，滤光镜可以选择性的改变入射光的状态，对入射光进行投射、反射、偏振、衰减、散射等操作。一般情况下，滤光镜紧贴在镜头的前面，光线通过滤光镜后发生一定的变化，变化后的光线通过镜头投射到 CCD 成像面上，产生不同的拍摄效果。一般的，我们可以按照目标光线的特性选择合适的滤光片，使镜头仅通过感兴趣的频率段的光。

常用的滤光镜有中色滤光镜、紫外线滤光镜、对比滤光镜及红外线滤光镜等，可以根据环境的不同对他们进行选择。

通过对镜头的研究，参考镜头的关键技术作为镜头选取的主要考虑因素。考虑到本研究以工业应用为背景，故而选用质量较好、畸变较小的工业级镜头；由于手眼标定为相对独立的内容，不涉及到真实跟踪过程中的弧光、飞溅等干扰，因而不考虑使用滤光

镜；同时由于真实跟踪过程中，摄像机相对目标工件的距离基本处于不变的状态，同时视场角变化均不大，故而不需要考虑使用自动调焦镜头。最后综合现实工作需求，选择了 Computar 公司的 M2514-MP 镜头，该镜头的给定焦距为 25mm 。

2.3 主动视觉系统的摄像机研究

摄像机作为图像采集过程中最重要的组成部分，对生成图像的质量有着最直接的影响，进而决定了后续图像处理的精度与效率。摄像机的内部由光电传感器（CCD 或 CMOS）、外加同步信号产生电路、视频信号处理电路及电源等组合而成。采集的图像质量好坏与光电传感器的材质和密度有很大的关联，为了获得较为清晰、对比度高的图像，这就要求我们根据实际的工作环境要求来对摄像机进行选择。而选取摄像机前需要对摄像机技术指标有一定的了解，下面将分别介绍数字摄像机、分辨率、帧速等基本概念。

数字摄像机的产品很多，其中较为适合工业应用的有数字工业相机，它可以利用光电传感器的图像感应功能，将物体反射的光信号进行转码、压缩、存储。它的优点是有很高的稳定性和噪声抑制能力，能提供高分辨率的图像信息。

分辨率（Resolution）是摄像机中最为重要的一个内容，对于数码产品而言，我们经常会使用分辨率来对其好坏进行区分。通常情况下，分辨率表示图像中每一个方向上的可分辨的像素数量。对于什么情况是可分辨的，瑞利判据给出了很好的回答。如图 2.7 所示，瑞利判据认为：假设有两个相同强度的相近点，当这两点的重叠部分 A_1 小于自身最大值 A_2 的 83% 时，这时人眼是可以分辨的^[17]。

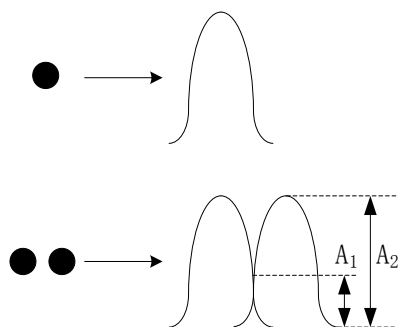


图 2.7 相近点重叠现象

对于主动视觉系统而言，高分辨率的摄像机可以拍摄出更为清晰的图像，将环境中的细节更加准确的还原出来，这对于后期的图像处理是有利的，可以有效减少有用信息的流失。然而一味追求高分辨率也不可取，它会造成计算机资源过度占用、增加图像处理时长等负面效果。可见，选择一个合适的分辨率对于摄像机的选取至关重要，应该在平衡资源与效果的基础上来进行抉择。

在视频图像处理中，我们常用帧速来描述视频中每秒钟图片的传输量，单位为帧/

秒 (*fps*), 其中, 一帧表示一副静止的图片。对于视频, 我们看到的动态效果实际上是一帧帧静止的图片组合而成的, 这需要摄像机在短时间内对图像进行快速采集并显示。当摄像机达不到快速采集的要求, 将会导致帧速过低, 这时我们看到的画面就会产生停顿、跳跃等现象。一般来说, 根据后期图像处理速度的要求, 我们应该在合适的范围内选择一个较高的帧速, 当然, 当帧速满足要求时就可以了, 帧速越高意味着价格越高。

对于摄像机的选取, 首先, 考虑到本研究的背景为工作应用, 必须选择拥有强稳定性和抗干扰性的工业数字摄像机; 其次, 本文后续的跟踪目标为空间的马鞍形曲线, 对于单独的线条而言, 对分辨率的要求不是很高; 另外, 现实的跟踪过程要求摄像机图像处理的速度约为 $100ms$ 。综合考虑以上几点, 最终选择了 Watec 公司的 WAT-902B 摄像机, 该摄像机的传感器类型为 CCD, 最大分辨率为 1004×1004 , 帧速为 $60fps$, 给定的像元大小为 $dx=0.0086mm$ 、 $dy=0.0083mm$ 。

2.4 DH-VT140 图像采集卡介绍

图像采集卡主要是实现将摄像机采集到的模拟信号进行采样量化后转换成数字图像, 并将其保存到工控机的内存或硬盘当中, 提供给后续图像处理或屏幕显示所用。其中, 图像采集卡传输接口的传输速率及传输通道的多少为其主要的技术指标。

为了配合后续跟踪, 图像采集卡应充分满足图像处理的时间要求, 简单来说, 在允许的范围内, 采集速度越快越好。本文所用主动视觉系统选取了大恒公司 VT 系列的 DH-VT140 图像卡。该卡具有高速的图像采集率 (大约为 $25ms$), 拥有 4 个图像采集通道, 同时它支持 WINDOWS NT、WINDOWS 2000 及 Linux 等环境及 VC、VB、BC、C++ 等开发工具。

2.5 IPC-610-L 工控机介绍

工控机偏向于工业的运用, 具有某些个人计算机所没有的特点。首先, 由于工业现场经常会有强烈的振动和意外撞击等, 因而工控机机箱需要特别加固, 通常机箱使用钢结构制成。其次, 由于工业现场环境较差, 通常工控机会暴露在大量的灰尘当中, 因而工控机应具有防尘的效果。再次, 由于工业现场电器使用较多, 电磁干扰较强, 因而工控机一般拥有独立电源, 且需具备良好的抗电磁干扰能力。最后, 一般的工控机都是固定在工业生产设备上的, 工业生产一般需要连续作业时间较长, 因而也要求工控机能长时间稳定的工作。

当然, 工控机也不是完全意义上的强于个人计算机, 只不过是更适合于工业的运用, 它较个人计算也有许多的不足: 工控机的硬盘一般都较小; 存储的数据安全性较低; 工控机的价格一般高于个人计算机等。

基于以上的标准最终选择了研华公司的 IPC-610-L, 该款工控机支持 ATX 主板, 有

多达 15 槽的 PICMG 无源底板；拥有抗冲击磁盘驱动器托架，可支持三个 5.25" 和一个 3.5" 磁盘驱动器。

2.6 主动视觉系统器件选取及实物搭建

2.6.1 主动视觉系统器件选取

如 2.1 至 2.5 小节的内容，对主动视觉系统的组成硬件及其性能指标进行了讨论，最终选择了如下器件：

光源：富镭公司的一字线激光器 FU635AL5-D12。

镜头：Computar 公司的 M2514-MP 镜头。

摄像机：Watec 公司的 WAT-902B 摄像机。

图像采集卡：大恒公司的 DH-VT140 图像采集卡。

工控机：研华公司的 IPC-610-L 工控机。

2.6.2 主动视觉系统实物搭建

完成了器件的选材之后，由这些器件搭建主动视觉系统，包括单目结构光系统及圆柱型焊接机器人两个主要部分，并具体分析其模型与功能。

（1）单目结构光系统

我们使用摄像机、线激光源、图像采集卡、工控机就可以组成一个单目结构光系统，其前端图像采集部分的实物及工作方式如图 2.8 所示。

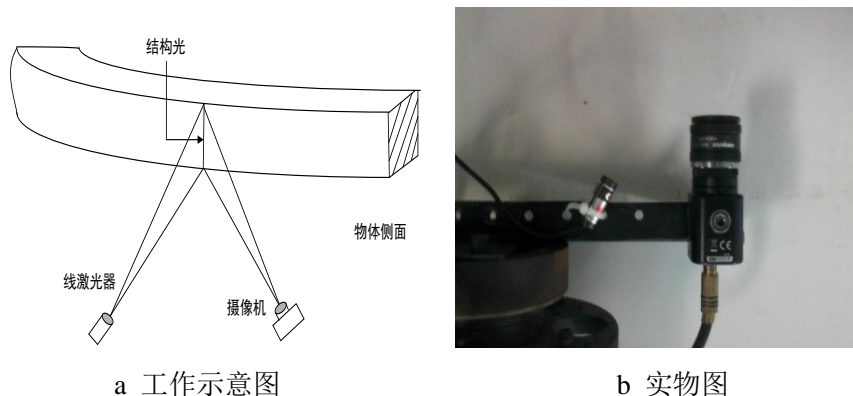


图 2.8 单目结构光系统工作示意图及实物图

单目结构光因其结构简单、安装方便、定位精度较高而被广泛使用于工业领域，如图 2.8 所示，摄像机与线激光源固定安装在一起，他们之间成一定的角度，我们称之为投射角，线激光源投射光线到被测物体上，在图像中形成一条带有特殊信息的亮线，计算机可以从这些图像中读出相应的信息进而对机械进行操作。

（2）圆柱型焊接机器人

圆柱型焊接机器人即主动视觉机器人，所用模型为焊接工业中常用的圆柱形模型，

实物及数学模型如图 2.9 所示,圆柱形焊接机器人可绕中心转轴 O_1O_2 带动整个机械旋转,旋转角度的大小可控可知,在主旋转轴上垂直安装可自由伸缩的臂 L_1 , L_1 的长度由激光测距仪精确测量出,且 L_1 伸缩的距离可控可知,在臂 L_1 的末端安装有可自由升降的臂 L_2 , L_2 与 O_1O_2 平行,升降的距离可控可知, L_2 的底部悬挂焊枪,同时在臂 L_2 上安装有结构光系统,结构光系统与焊枪为固定连接,随臂 L_2 的升降而升降,但相对位置不会发生改变。

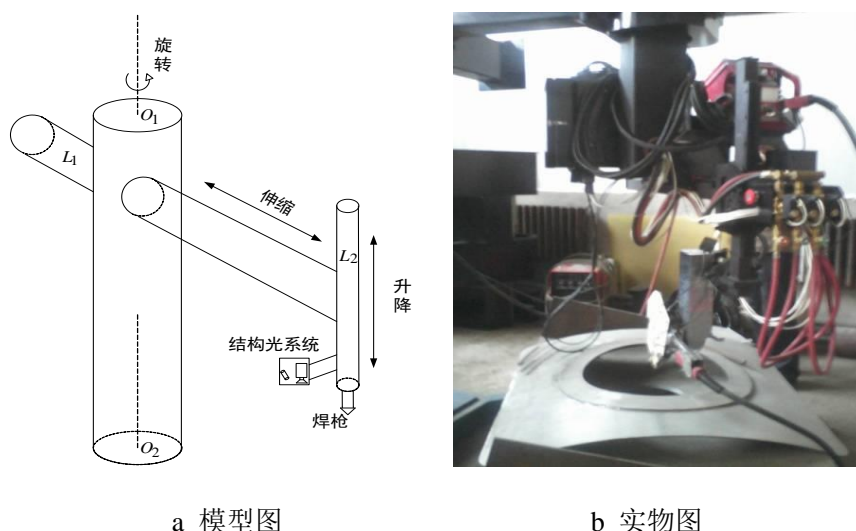


图 2.9 圆柱形焊接机器人数学模型及实物

如图 2.9 所示,在机械臂 L_2 末端的结构光系统负责采集带有特殊信息的图像,然后将附带信息的图像传递给计算机,计算机通过图像处理与相应的识别方法得出对应的控制量,驱动控制器,控制机器人各轴运动,最终将机械臂 L_2 末端的焊枪挪动到期望的目标点位上去。

2.7 本章小结

本章主要对主动视觉系统的硬件部分进行了研究。对于光源、镜头、摄像机等关键器件的技术指标进行了研究,根据现实环境对这些设备进行了讨论选材。然后分别介绍了所选 DH-VT140 图像采集卡与 IPC-610-L 工控机的特性。最后在选定这些必须的硬件器件后,以实物图加模型图的方式给出了由这些器件组成的单目结构光系统和圆柱型焊接机器人,并定性分析了这些系统的功能与主要参数。

第3章 主动视觉系统内参数标定

主动视觉系统标定主要包括两部分的内容：一个是系统内参数的标定，也既是结构光系统参数和摄像机参数的标定；另一个是系统外参数的标定，就是本文主要研究的手眼标定^[18]。内参数的标定是手眼标定的前提和基础，故而本章先对内参数的标定进行分析研究。

本章对摄像机模型选取、坐标系定义和三角测量原理等进行了研究总结，对经典的视觉系统内参数标定（张氏标定法）进行了深入研究，并对单目结构光系统进行了定量分析、建模。在此基础上提出了改进的视觉系统内参数标定方法，最后对此改进的内参数标定方法进行了实验验证。

3.1 常用坐标系

所谓成像，就是将客观世界的三维信息投影到 CCD 摄像机的二维平面上^[19]。成像涉及到不同坐标系之间的空间变换^[20]，为了描述此过程，首先对常用的几种坐标系进行以下定义：

（1）图像坐标系：我们所看到的图像并不是摄像机采集到的信号的直接复现，摄像机采集到的只是模拟信号，这些量是人类无法理解的，必须经由计算机的 A/D 转换，将这些模拟信号转为数字信号，显示在屏幕上，人类才能加以识别。我们称一幅图像为一帧，每帧数字图像由 $M \times N$ 个像素组成， M 、 N 分别表示像素的总行数与总列数。

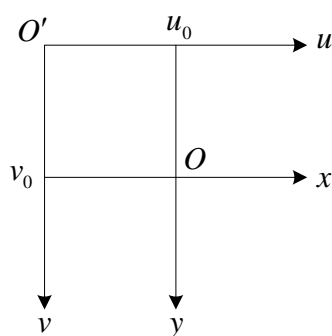


图 3.1 图像坐标系的示意图

如图 3.1 所示，以图像左上角点 O' 为原点建立直角坐标系，则各像素点可表示为 (u, v) ， u 代表了该像素点在数组中的列数， v 代表了该像素点在数组中的行数。由于 (u, v) 并不具备物理含义，没有实际的大小及单位，所以需要建立一个新的具有物理意义的坐标系与之对应起来。以图像中某一点 O （一般选取图像正中心）为原点，建立坐标系 $O-xy$ ， x 、 y 分别与 u 、 v 轴平行。若对于图像中的任意像素点，在 x 轴与 y 轴方

向上的大小均为 dx 、 dy ，则对于图像中的点有 (3-1)：

$$\begin{aligned} x &= dx(u - u_0) \\ y &= dy(v - v_0) \end{aligned} \quad (3-1)$$

为方便使用，我们可以将式 (3-1) 表示成矩阵形式，矩阵形式如式 (3-2)：

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

由于现在科技的进步，光学系统能够做的非常精确，透镜的光轴可以很好的对称、垂直通过摄像机成像面，即透镜光轴能与摄像机成像面交于图像平面正中心，如果以这点为原点 O 建立坐标系 $O-xy$ 的话，可以利用结构的对称性简化许多的计算问题。当然这种情况也不是绝对的，当对光学系统的模型精度要求较高时，应该充分考虑到交点与图像正中心的不重合性。

(2) 摄像机坐标系：如图 3.2 所示，以透镜中心 O_c 为原点建立坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ ，其中 X_c 轴、 Y_c 轴分别与图像坐标系的 x 轴、 y 轴平行，根据右手定则确定 Z_c 轴， $O_c - X_c Y_c Z_c$ 即为摄像机坐标系， OO_c 为摄像机焦距。

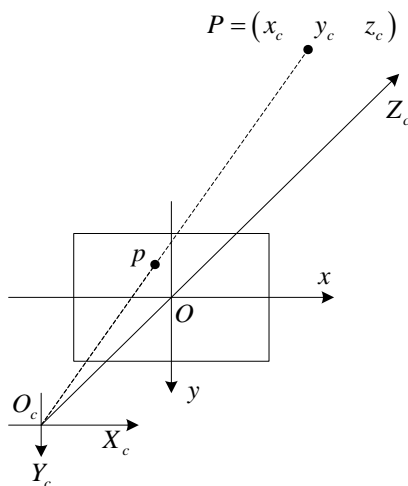


图 3.2 摄像机坐标系的示意图

(3) 世界坐标系：摄像机坐标系表示的坐标仅仅是以自身为参考的，并不具备一般性，随着摄像机摆放位置的不同，摄像机坐标系也会跟着变化，因此需要一个基准坐标系来描述摄像机及周围环境的位置，我们引入世界坐标系，以其作为其他坐标系的基准，用 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 表示。摄像机坐标系与世界坐标系之间存在一一对应的关系，用旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 来进行描述（会在 4.1 节中介绍）。对于空间中任意一点 P ，满足如下关系式 (3-3)：

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

其中 R 为 3×3 正交单位阵, T 为 3×1 列向量, $0 = (0 \ 0 \ 0)$; M_2 为 4×4 方阵, 称为摄像机外参数矩阵。

3.2 摄像机模型分类与研究

世界坐标系中的任意一点, 通过摄像机拍摄, 都会在摄像机成像面上形式唯一与之对应的一点, 这种对应关系是由摄像机成像的几何模型决定。我们常说的摄像机内参数正是这些几何模型中的未知结构参数, 摄像机标定正是为了精确求解这些参数。

摄像机模型一般分为线性模型和非线性模型, 这种区分是以是否考虑镜头的畸变为依据的^[21]。线性模型又称为针孔模型, 因其原理简单、计算方便, 经常被选为摄像机标定的讨论模型^[22]。这种模型不考虑镜头的畸变, 将物体的投影过程简化为小孔成像过程。当线性模型不足以准确描述摄像机的成像关系或着有更高的精度要求时, 就必须引入非线性模型, 非线性模型是在针孔模型上加入镜头畸变和变形后的结果, 这些畸变可总结为径向、离心和薄棱镜畸变^[23]。

3.2.1 线性模型

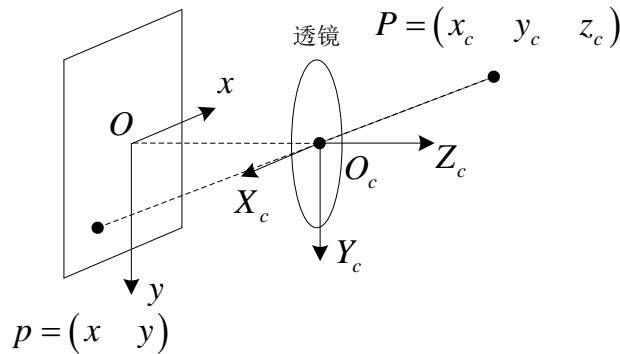


图 3.3 摄像机线性模型示意图

线性模型是一种理想化的模型, 是摄像机模型中最简单的一种, 他依据小孔成像原理来模拟摄像机的成像过程, 这种投影关系也称为中心摄影或透视摄影。如图 3.3 所示, 空间中任意一点 P , 他在图像上的投影位置为 p , 则根据比例关系可得式 (3-4):

$$\begin{aligned} x &= \frac{f \cdot x_c}{z_c} \\ y &= \frac{f \cdot y_c}{z_c} \end{aligned} \quad (3-4)$$

其中, f 为摄像机焦距; $(x \ y)$ 为 p 点的图像坐标; $(x_c \ y_c \ z_c)$ 为 P 点的摄像机坐标。为了方便推理计算, 可将式 (3-4) 改写成矩阵形式 (3-5):

$$z_c \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

将 3.1 节中的式 (3-2) 和 (3-3) 代入到 (3-5) 中, 可得到更为直观的从图像坐标到摄像机坐标再到世界坐标的转换关系, 如式 (3-6):

$$\begin{aligned} z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= M_1 M_2 \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中, $\alpha_x = f/dx$, 称为 u 轴的尺度因子; $\alpha_y = f/dy$, 称为 v 轴的尺度因子; M_1 为 3×4 矩阵, 他包括 α_x 、 α_y 、 u_0 、 v_0 , 因此称为摄像机内参数矩阵; $M_1 M_2$ 合称为摄像机参数。

3.2.2 非线性模型

在使用摄像机和镜头的过程中, 会发现理论的成像与现实的成像存在不一致的现象, 这是不可避免的现实情况, 也是我们将要说明的非线性模型^[24-25]。造成这种成像不一致的原因很多, 如: 镜头非线性变形、成像过程不稳定、图像分辨率低等。

我们通常考虑的镜头畸变有径向、离心和薄棱镜畸变这 3 种。相应的也有 3 种对应的数学模型, 下面将对他们分别进行讨论。

假设空间中有一点 P , (x, y) 为其在线性模型下的图像坐标, (x', y') 为受畸变影响后的真实图像坐标, 则根据 P 点可以得到如下等式:

$$\begin{aligned} x &= x' + \delta_x \\ y &= y' + \delta_y \end{aligned} \quad (3-7)$$

其中, δ_x 、 δ_y 为非线性畸变量。

我们将畸变量进行细化可以得到：

$$\delta_x(x, y) = k_1 x(x^2 + y^2) + (p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy) + s_1(x^2 + y^2) \quad (3-8)$$

$$\delta_y(x, y) = k_2 y(x^2 + y^2) + (p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1 xy) + s_2(x^2 + y^2) \quad (3-9)$$

其中， k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 、 s_1 、 s_2 为非线性畸变参数。

(1) 径向畸变

径向畸变是由镜头的形状缺陷造成的，又细分为正向畸变和负向畸变，是关于主光轴对称的。其数学公式如 (3-8)、(3-9) 的第一项。

(2) 离心畸变

离心畸变的产生原因是摄像机的主光轴与实际的几何中心不一致，即由于安装等问题，使得光学系统各器件的光学中心不严格共线。径向畸变是离心畸变的一部分，同时离心畸变还应充分考虑切向畸变。其数学公式如 (3-8)、(3-9) 的第二项。

(3) 薄棱镜畸变

薄棱镜畸变是不可避免的，他的大小由镜头的制作和安装工艺决定。薄棱镜畸变也是径向畸变和切向畸变的结合体，其数学公式如 (3-8)、(3-9) 的第三项。

按照一般的思维，对未知因素考虑的越多，得到的结果也会越精确。然而，对于摄像机来说确并非如此，过多的引入非线性参数不仅会使得计算过程复杂度提高，而且会造成解的不稳定。同时随着加工业的迅速发展，光学镜头可以达到很高的制作水平，大部分畸变都可以视情况进行忽略。在精度要求不是很高的运用场合，可以仅考虑径向畸变。

3.3 摄像机标定研究

3.3.1 摄像机标定分类

摄像机标定作为机器视觉的基础，在手眼标定中的重要性不言而喻，摄像机的标定精度直接影响着后续跟踪等操作的准确性。摄像机标定作为一门独立的学科迅速发展并完善，综合以往的标定方法大体上可以将其分为三类：传统的摄像机标定方法、摄像机自标定方法和主动视觉标定方法。

(1) 传统的摄像机标定方法（强标定方法）标定精度较高，适用于任何摄像机模型；缺点是需要特定的标定快，携带不方便，且计算过程较为复杂。

传统摄像机标定方法有一个共同的标定思路，就是需要使用已知的特定标定物，通过摄像机观察标定物上的特征点，这些点在图像中的位置与他们的三维坐标之间的存在对应关系，以此来对未知参数进行求解。传统的摄像机标定方法有多种分类方式，下面根据摄像机模型的选取差异来对传统摄像机标定方法进行分类研究。

根据摄像机模型的选取差异,可以将传统的摄像机标定方法分为线性摄像机标定方法、非线性摄像机标定方法和两步法^[10]。

线性摄像机标定方法选用了线性模型,即最简单的针孔模型,通过解线性方程获得摄像机的参数,该算法速度快,运用简单,应用比较广泛。其中最常见的直接线性变换(DLT)法是由 Abdel-Aziz 和 Karsra 于 1971 年提出的^[26]。然而此类方法也由其固有的缺点,由于其采用了线性模型,没有考虑镜头的畸变等因素,因而结果标定精度不是很高,且对噪声很敏感。

非线性标定方法与线性标定方法最大的不同在于模型的选取,它有考虑到镜头的畸变,引入的畸变参数越多,非线性模型也就越能准确还原摄像机的成像过程,然而这些都是以庞大的计算为代价的。而且这类方法大部分是使用迭代来进行计算,计算结果的好坏依赖于初始值的估计,一个偏差较大的初始值很可能引起解的不稳定。这类标定方法的代表人物是 C Stama^[27]、D B Gennery^[28]和 Salvi^[29]。

两步法综合了以上两种方法的优点,仅加入了镜头的径向畸变参数,提高了标定结果的精度,计算过程的复杂程度也合理。这类标定方法最具代表性的是 Tsai 的两步法^[30],此外还有 Weng^[31]、Z Zhang^[32]等也提出了许多不错的方法。

(2) 摄像机自标定方法是一种不需要标定物的标定方法,对于一些不适合使用标定物或者频繁需要标定的场合,这种标定方法尤为实用,因此受到广泛的关注。这种方法标定灵活,仅需要控制摄像机运动,利用摄像机在不同位置下周围环境以及其成像的对应关系建立数学方程,即可解出摄像机参数。此类方法最具有代表性的是马颂德提出的“基于两组三正交运动的线性方法”^[33],第 4 章将对此方法进行详细介绍。此类方法也存在很大的缺点,就是解的不唯一性和抗噪声干扰能力差。

(3) 主动视觉标定方法也可以与自标定方法归为一类,他与自标定方法不同点在于他有使用外部光源,使摄像机能够采集到特殊的信息,并以此来进行计算和求解。主动视觉标定方法在近年来也收获了不少成功,他鲁棒性强,可以用线性方法求解,但是他适合的场合也比较局限,只能应用于相机运动可控可知的环境下^[34-35]。

3.3.2 基于 2D 平面靶的摄像机标定

下文将针对目前使用最多、经典的张正友提出的基于 2D 平面靶的摄像机标定方法进行研究。

这种标定方法有其前提条件,即摄像机内部参数固定不变或对变化不敏感,对外部参数则没有要求。此外摄像机选用针孔模型,为了计算更加精确,添加一个 u 轴与 v 轴的不垂直因子 γ 。如图 3.4 所示标定靶,设标定靶上一点 $M = (x \ y \ z)^T$, 其在图像坐标系中的坐标为 $m = (u \ v)^T$ 。

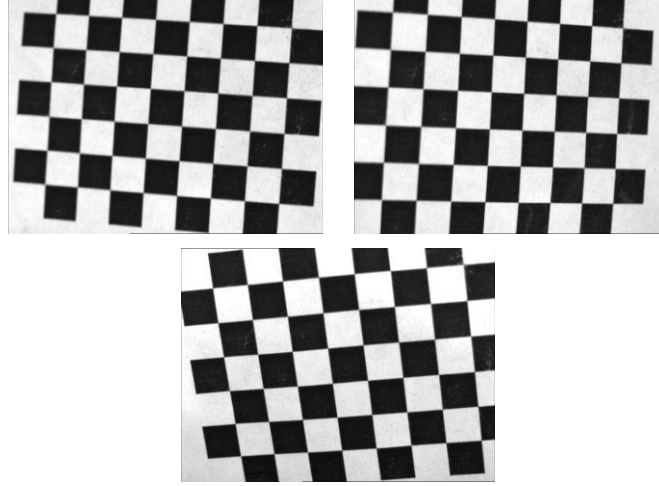


图 3.4 不同姿态下的标定靶图像

根据式 (3-6)，我们可以将标定靶上任意一点的图像坐标与世界坐标之间的关系写成式(3-10)，这对于标定靶上的每一点都是成立的。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (R \quad T) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = A(R \quad T) \bar{M} \quad (3-10)$$

其中， s 是任意标准矢量， $\bar{m} = (u \ v \ 1)^T$ ，为图像坐标的扩展形式； $\bar{M} = (x \ y \ z \ 1)^T$ ，为世界坐标的扩展形式。

这里我们假设标定靶平面与世界坐标系的 XOY 面重合，即标定靶上的所有点 $z=0$ ，则上式可改写为：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = HM' \quad (3-11)$$

其中， r_1 、 r_2 、 r_3 分别为旋转矩阵的列； $M' = (x \ y \ 1)^T$ ，为标定靶面上的齐次世界坐标。根据图像与标定靶上对应点的关系，则可解出 (3-11)，得到最优解 H 。令 $H = (h_1 \ h_2 \ h_3)$ ，由于旋转矩阵 R 为正交阵，故而可得：

$$\begin{aligned} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 &= 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 &= h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{aligned} \quad (3-12)$$

对于标定靶的某一姿态，很显然式 (3-12) 限定了两个约束。假设有一对称矩阵 B ，表示为：

$$\begin{aligned}
 B &= A^{-T} A^{-1} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha_x^2} & -\frac{\gamma}{\alpha_x^2 \alpha_y} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \alpha_y)}{\alpha_x^2 \alpha_y} \\ -\frac{\gamma}{\alpha_x^2 \alpha_y} & \frac{\gamma^2}{\alpha_x^2 \alpha_y} + \frac{1}{\alpha_y^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \alpha_y)}{\alpha_x^2 \alpha_y} - \frac{v_0}{\alpha_y^2} \\ \frac{(v_0 \gamma - u_0 \alpha_y)}{\alpha_x^2 \alpha_y} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \alpha_y)}{\alpha_x^2 \alpha_y} - \frac{v_0}{\alpha_y} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \alpha_y)^2}{\alpha_x^2 \alpha_y} + \frac{v_0}{\alpha_y^2} + 1 \end{pmatrix} \quad (3-13)
 \end{aligned}$$

其中, B 为对称矩阵, 运用绝对二次曲线原理可求出 B , 可以将 B 写成向量形式, 即:

$$b = (B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33})^T \quad (3-14)$$

我们可以将 H 改写为:

$$h_i = (h_{i1}, h_{i2}, h_{i3})^T \quad (3-15)$$

由式 (3-12)、(3-15) 可得:

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad (3-16)$$

由 (3-16) 可得:

$$v_{ij} = (h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3})^T \quad (3-17)$$

根据 (3-12) 的限制条件, 可知:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (3-18)$$

由式 (3-18) 可知, 每张图像可得到两个求解方程, 而摄像机未知参数共有 6 个。也就是说只要得到三幅以上的图像即可解出所有的未知参数, 即完成摄像机标定。

完成摄像机的标定后并不意味着图像平面与世界坐标系中的点实现了一一对应。由式 (3-6) 可以看出, 当已知世界坐标系中一点 P 时, 可以用式 (3-6) 求出其图像坐标系中的坐标 p ; 但是反过来, 当已知图像坐标系中一点 p 时, 得到的确实一簇点, 如图 3.3 所示, 位于 OP 直线上的点均符合 (3-6) 的约束。所以对于深度信息的测量计算, 还需要借助其他测量的方法, 由此我们引入了单目结构光系统, 单目结构光系统可以很好的解决这一问题, 实现图像坐标与世界坐标的一一对应。

3.4 单目结构光系统定量建模与测量

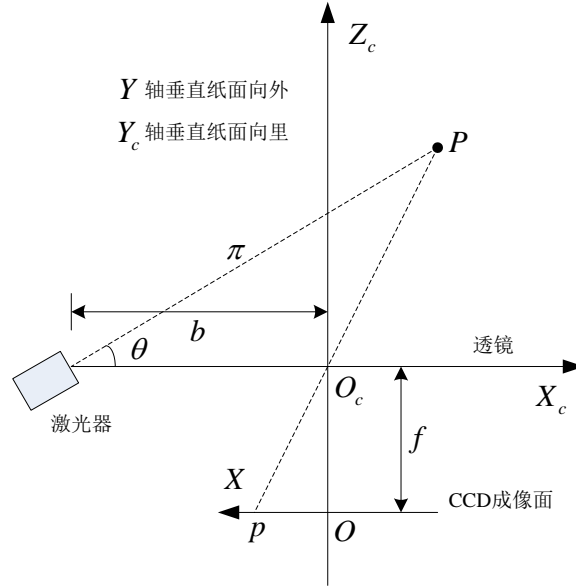


图 3.5 单目结构光系统原理图

单目结构光系统由线激光源与摄像机组成，激光源固定安装在摄像机的一侧，如图 2.8 所示，由 2.1 节可知，激光能量集中，当激光照射在物体表面时，在摄像机中会形成对比度较高的图片，为特征的提取带来便利。线激光照射出来形成一个激光面 π ，如图 3.5 所示， $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为以光轴与透镜交点为原点的摄像机坐标系， $O - XY$ 为图像坐标系。设激光面上一点 $P = (x_c \ y_c \ z_c)$ ，在图像上对应点为 $p = (x \ y)$ ，由三角法测量原理可得式 (3-19)：

$$\frac{x_c}{x} = \frac{z_c}{f}, \frac{y_c}{y} = \frac{z_c}{f}, \tan \theta = \frac{z_c}{b + x_c} \quad (3-19)$$

其中， f 为摄像机的焦距； b 为激光面与 X_c 轴的交点至光轴中心的距离，称为基线长； θ 为激光面与 X_c 轴的夹角，称为投射角。将式 (3-13) 进行处理后，可将其写成矩阵形式，如式 (3-20)：

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \frac{b}{f \cot \theta - x} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

假设式中的焦距 f ，基线长 b 以及投射角 θ 均可知，则由式 (3-20) 可以看出，对于三维空间中的任意一点均可实现与二维图像坐标系的一一对应，从而解决了上一节留下来的问题。求解焦距 f 、基线长 b 以及投射角 θ 的过程称之为单目结构光系统的标定。

3.5 单目结构光系统标定研究

单目结构光系统的标定是确定结构光与摄像机空间位置关系的过程。运用逆向思

维，由公式 (3-20) 可以看出，只要知道激光面 π 中的三个点以及其在 CCD 成像面对应的坐标，运用解多元方程的方法即可标定出这些参数。这是结构光标定的主体思想，然而其中标定点的准确获取是一个重点和难点问题，这类方法的比较具有代表性的有：拉丝法，由 R.Dewar^[36]和 K.W.James^[37]提出并使用；锯齿靶法，由段发阶^[38]等人提出；微分法，由邹定海^[39]提出；匹配法，由 Chen^[40]提出。

下面重点研究一种基于“消隐点”的单目结构光标定方法，这种方法是源于自标定理论影响而产生的。

3.5.1 消隐点

当人登高远眺，向最远处望去的时候，会看到地面在无穷远处形成的是一条直线。我们假设这个平面为 π ，其在无穷远处形成的直线为 l ， l 在摄像机中投影后，将在 CCD 成像面中形成一条直线，我们称这条直线为消隐线。根据几何的知识，两条平行的直线将在无穷远处相交于一点，因此平行的直线有一个相同的点，我们称之为消隐点，且消隐点只与直线的方向相关，与直线的位置无关。

3.5.2 基于“消隐点”的结构光标定方法

将式 (3-1) 代入式 (3-20)，可得下式 (3-21)：

$$\begin{cases} x_c = \frac{dx(u-u_0) \cdot b}{f \cdot \cot \theta - dx(u-u_0)} \\ y_c = \frac{dy(v-v_0) \cdot b}{f \cdot \cot \theta - dx(u-u_0)} \\ z_c = \frac{f \cdot b}{f \cdot \cot \theta - dx(u-u_0)} \end{cases} \quad (3-21)$$

其中， $(u_0 \ v_0)$ 为光轴的成像点，即成像面的几何中心； $(x_c \ y_c \ z_c)$ 为目标点的摄像坐标； $(u \ v)$ 为目标点在 CCD 成像面上投影点的图像坐标。

由上一小节的内容可知，若当前点为消隐点时，则 $(x_c \ y_c \ z_c) \rightarrow \infty$ ， $z_c \rightarrow \infty$ 可推知式 (3-21) 中 z_c 的分母趋近于 0，也即：

$$f \cdot \cot \theta = dx(u-u_0) \quad (3-22)$$

其中， f 、 u_0 、 dx 均为已知量，已由摄像机标定得到，若当前无穷远点的图像坐标 u 可求出，则可标定出结构光的投射角 θ 。

再次对式 (3-21) 进行分析，将 y_c 写成全微分形式，如下：

$$\Delta y_c = \frac{\partial y_c}{\partial v} \cdot \Delta v + \frac{\partial y_c}{\partial u} \cdot \Delta u = \frac{dy \cdot b}{f \cot \theta - dx(u-u_0)} \cdot \Delta v + \frac{\partial y_c}{\partial u} \cdot \Delta u \quad (3-23)$$

若令 $\Delta u = 0$ ，则上式 (3-23) 可以写为：

$$\Delta y_c = \frac{dy \cdot b}{f \cot \theta - dx(u - u_0)} \cdot \Delta v \quad (3-24)$$

实际上式 (3-24) 为 y_c 对 v 的偏微分表达式, 由此可得:

$$b = \frac{f \cot \theta - dx(u - u_0)}{\Delta v \cdot dy} \cdot \Delta y_c \quad (3-25)$$

其中, f 、 θ 、 u_0 、 dx 、 dy 已经标定得到, 为已知量; u 为当前图像坐标, 可从图像中直接读出; 若知微分过程中 Δy_c 和 Δv 的大小可控, 则可标定出结构光的基线长 b 。由此将式 (3-20) 中全部的未知量准确标定出, 完成了主动视觉系统的内参数标定。

3.6 改进的主动视觉系统内参数标定方法

综合上几节的内容可以看出, 摄像机的标定与结构光的标定是分开进行的, 这样不仅使标定的劳动量增大, 而且在标定过程中会引入更多的误差。为了使主动视觉系统内参数标定方法简单、快速, 更加适合工业运用, 对内参数标定方法进行了研究。

本文采用的镜头为工业镜头, 工业级镜头由于图像质量好、畸变小, 故可选取针孔模型作为摄像机的模型来进行讨论, 后续实验也证明了这种想法的正确性, 由于选用了针孔模型, 大大简化了标定过程, 未知参数也减少为 f 、 b 、 θ 这三个。

运用消隐点的思想来对式 (3-21) 进行讨论。同样的, 由 $z_c \rightarrow \infty$ 可得到:

$$f \cdot \cot \theta = dx(u - u_0) \quad (3-26)$$

其中, 将 $f \cot \theta$ 看作一个整体, 为已知量。将 y_c 对 v 的进行偏微分可得到:

$$b = \frac{f \cot \theta - dx(u - u_0)}{\Delta v \cdot dy} \cdot \Delta y_c \quad (3-27)$$

将 (3-26) 代入 (3-27) 可得:

$$b = \frac{dx(u_\infty - u_0) - dx(u - u_0)}{\Delta v \cdot dy} \cdot \Delta y_c \quad (3-28)$$

其中 u_∞ 为消隐点在图像坐标系中的坐标; u 为当前目标点的在图像坐标系中的坐标; u_0 、 dx 、 dy 均已知; 若制微分过程中 Δy_c 和 Δv 的大小可控, 则可标定出基线长 b 。由激光面 π 中 n 个不同深度的点可得到一组 z_c , 将其表示为:

$$z_{ci} = \frac{f \cdot b}{f \cot \theta - dx(u_i - u_0)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-29)$$

平面 π 上任意两点为 j 、 k ($1 \leq j < k \leq n$), 其高度差可表示为:

$$z_{cj} - z_{ck} = \frac{f \cdot b [dx(u_j - u_0) - dx(u_k - u_0)]}{[f \cot \theta - dx(u_j - u_0)][f \cot \theta - dx(u_k - u_0)]} \quad (3-30)$$

整理可得:

$$f = \frac{[f \cot \theta - dx(u_j - u_0)][f \cot \theta - dx(u_k - u_0)]}{b [dx(u_j - u_0) - dx(u_k - u_0)]} \cdot (z_{cj} - z_{ck}) \quad (3-31)$$

其中, $f \cot \theta$ 为已知量; b 已经标定得出; u_j 、 u_k 为两幅图像中目标点的图像坐标, 可从图像中读出; u_0 、 dx 为已知量; $z_{cj} - z_{ck}$ 为摄像机移动的深度差, 可控可知。故可标定出焦距 f 。

将焦距 f 代入到式 (3-26) 即可标定出投射角 θ , 从而一次性的完成了整个视觉系统内参数的标定。

下面对最小二乘法拟合直线进行分析研究。

最小二乘法能够最小化误差, 使尽可能多的有效数据落到拟合的线条上, 它是一种有效的数据优化方法。将其引用到文中直线的拟合中, 可以有效的提高拟合直线的准确性。

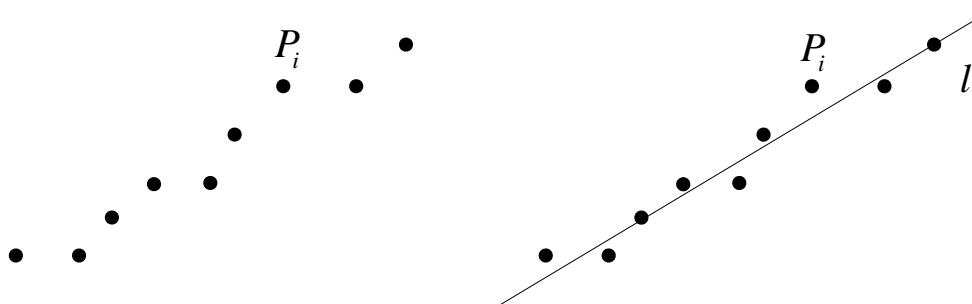


图 3.6 待拟合点与拟合直线

如图 3.6 所示, 假设有一系列点 $P_i (i=1,2,\dots,n)$, 其坐标表示为 (x_i, y_i) , 我们想用计算的方法找出最佳的拟合直线 l , 使各点与拟合直线误差的平方和达到最小。

假设直线方程为:

$$y = ax + b \quad (3-32)$$

为计算方便, 我们设误差函数为 F , 由式 (3-32) 可得:

$$F = y - ax - b \quad (3-33)$$

显然对于待拟合点 P_i , F 的值为零是最理想的情况, 表示正好在拟合直线上。但待拟合点不可能都在拟合直线上, 同时 F 的值也有正有负, 因而为讨论误差的最小化情况, 我们以 F_i^2 来说明待拟合点的误差程度。

我们用 E 表示拟合直线误差的平方和, 可得:

$$E = \sum_{i=1}^n F_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (3-34)$$

将 E 分别对 a 、 b 求一阶偏导数可得:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = -2 \left(\sum_{i=1}^n y_i - na - b \sum_{i=1}^n x_i \right), \quad \frac{\partial E}{\partial b} = -2 \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \quad (3-35)$$

对其求二阶偏导数可得:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial a^2} = 2n, \quad \frac{\partial^2 E}{\partial b^2} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (3-36)$$

由式(3-36)可以看出, E 对 a 、 b 的二阶偏导数均大于 0, 此满足函数求极小值条件, 令 E 的一阶偏导数为 0 可得:

$$\sum_{i=1}^n y_i - na - b \sum_{i=1}^n x_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n x_i y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \quad (3-37)$$

由式(3-37)即可解得最优化直线拟合参数 a 、 b , 可表示为:

$$b = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) / \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \quad (3-38)$$

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3-39)$$

将 a 、 b 代入直线方程(3-32), 即得到了待拟合的直线。

3.7 主动视觉系统内参数标定实验及误差分析

3.7.1 主动视觉系统内参数标定实验

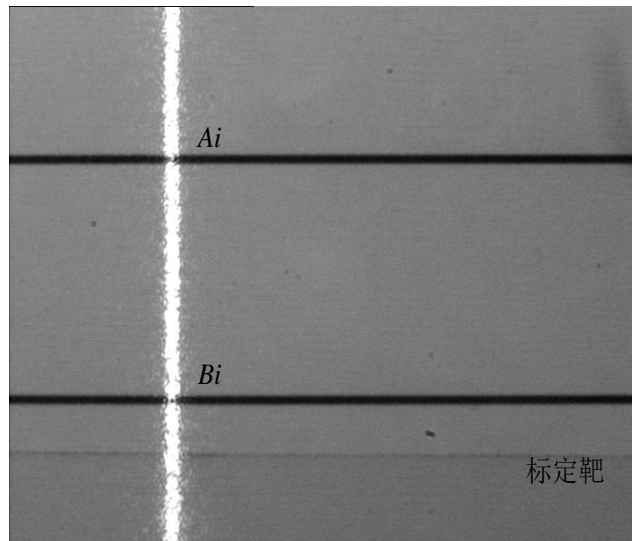


图 3.7 两平行线标定靶

本文采用一对共面的平行线作为标定靶, 用 A4 纸打印的一对平行线即可, 平行线间的间距严格已知, 将标定靶贴在硬纸板上, 然后水平放置, 使整个标定靶与地面保持平行状态。然后调整摄像机及激光器的位置, 使摄像机光轴垂直于硬纸板, 并且可以控制摄像机沿光轴的方向上下移动。如图 3.7 所示, 激光面 π 与两条平行线分别相交于 A 、 B 两点, A 、 B 为图像坐标系中的点, 可以从图中读出。控制摄像机沿光轴的方向移动,

则得出一系列的交点 A_i 、 B_i ($i=1,2,\dots,n$)，这些交点在物空间的激光面 π 上形成了两条平行线。由于 CCD 摄像机的成像面与激光面 π 不平行，因此，图中的两条平行线必然于无穷远处相交于某一点，这个交点就是前文所述的消隐点。

本文采用的图像采集卡为大恒公司的 VT-140，初始化像素为 768×576 ；实验采用线性模型作为摄像机模型来进行实验研究，所以可知 $u_0=384$ 、 $v_0=288$ 、 $dx=0.0086mm$ 、 $dy=0.0083mm$ ；所用共面平行线标定靶的线间距为 $20mm$ 。

按传统方法对上述视觉系统内参数分别进行标定，标定出的结果为：基线长 $b=75.44mm$ 、焦距 $f=26.31mm$ ，投射角 $\theta=76.16^\circ$ 。以此作为参考，进行误差分析。

调整传感器的位置，使激光面 π 与标定靶的交线和 Y_c 轴平行，即 CCD 成像面中形成的激光线条与图像坐标系的 Y 轴平行，在这条激光线条上便可以体现出 $\Delta u = 0$ 。沿摄像机光轴方向每次抬高 $10mm$ ，采集图像，并经过图像处理及计算提取出 A_i 、 B_i ($i=1,2,\dots,n$) 在图像坐标系中的坐标，结果如表 3.1 所示。

表 3.1 A_i 、 B_i 的像平面坐标序列对

i	A_i	B_i
1	(157.1,162.6)	(157.1,431.9)
2	(196.9,164.4)	(196.9,423.0)
3	(233.9,166.1)	(233.9,414.4)
4	(267.8,168.3)	(267.8,407.2)
5	(299.8,169.7)	(299.8,399.9)
6	(329.1,171.7)	(329.1,393.9)
7	(355.9,173.1)	(355.9,387.8)
8	(381.9,174.6)	(381.9,382.2)
9	(405.9,176.6)	(405.9,377.3)
10	(428.6,177.4)	(428.6,372.1)
11	(449.8,178.8)	(449.8,368.0)
12	(469.7,179.8)	(469.7,363.3)
13	(488.4,181.0)	(488.4,359.3)
14	(506.3,182.2)	(506.3,355.7)

根据最小二乘法原理将 A_i 、 B_i ($i=1,2,\dots,n$) 分别拟合成直线，并求出两条直线交点，这个交点便是消隐点。用最小二乘拟合的直线分别为：

$$v = 0.057(u - 355.1) + 173.3 \quad (3-40)$$

$$v' = -0.218(u' - 355.1) + 388.3 \quad (3-41)$$

求出消隐点的 $u=1137.734863$ ，继而通过式 (3-28) 便可求出基线长 b ，标定结果如表 3.2 所示。

在控制摄像机沿光轴方向移动的过程中，产生了一系列的图像，将相邻两幅图像相减，得出一系列 $z_{ci} - z_{c(i-1)}$ ，利用式 (3-31) 便可求出焦距 f ，继而使用式 (3-26) 求出 θ ，标定结果如表 3.3 所示。

表 3.2 基线长 b 标定结果

	b (mm)	误差(mm)
1	75.457301	0.017301
2	75.416125	-0.023875
3	75.426801	-0.013199
4	75.445223	0.005223
5	75.425554	-0.014446
6	75.432084	-0.007916
7	75.441136	0.001136
8	75.458463	0.018463
9	75.528433	0.088433
10	75.450682	0.010682
11	75.361503	-0.078497
12	75.441313	0.001313
13	75.442167	0.002167
均值	75.440519	0.000519

表 3.3 焦距 f ，投影角 θ 的标定结果

	f (mm)	$\theta(^{\circ})$
1	26.3819	76.1957
2	26.2823	76.1454
3	26.3408	76.1750
4	26.2614	76.1348
5	26.2834	76.1459
6	26.3744	76.1919
7	26.3170	76.1630
8	26.3004	76.1545
9	26.2764	76.1424
10	26.2765	76.1425
11	26.2825	76.1455
12	26.2897	76.1491
13	26.2770	76.1427
均值	26.3033	76.1560
均值误差	-0.0067	-0.0040

从标定结果可以看出，视觉系统参数的计算结果平均误差极小，其相对误差都小于 10^{-2} ，标定的精度较高。

3.7.2 误差分析

经过对实验过程和实验结果的分析，对于改进后的视觉系统内参数标定方法的误差和波动的原因做出如下解释。

(1) 摄像机使用的是线性模型。这是这类方法的固有缺点，由于没有考虑可能存在的畸变，故而对结果的精度必然有一定的影响。

(2) 摄像机的放置不能达到完全的水平。由于后续的计算方法都是建立在摄像机与标定靶平行的基础上的, 如果摄像机的放置并未达到初始的要求, 那么将会对实验及结果产生一定的影响。

(3) 标定靶中两平行线间距不够精确。由于标定靶是由打印机印出来的两条黑线, 这对平行线有一定的宽度, 我们给出的线间距只是绘制时的理论长度, 由于标定靶放置不平、纸张鼓包等原因, 很有可能改变平行线间距的大小。

(4) 图像处理不够精确。由于处理图像的程序比较简单, 摄像机的分辨率也比较有限, 导致最终采集到的特征点都是带有一定偏差的, 后续的计算都是夹杂着这些误差信息, 故而会对结果产生一定的影响。

3.8 本章小结

本章首先对常用坐标系和摄像机模型进行了介绍说明, 并结合本文的环境选取了适合的摄像机模型。然后对常见的摄像机标定方法进行了分类, 详细介绍了一种基于 2D 平面靶的摄像机标定方法, 这也是摄像机标定中比较常用的一种方法。之后又引出了单目结构光系统, 单目结构光系统被本文运用于三维测量和空间定位, 对于他的常用标定方法也进行了深入的研究和总结。针对于本文要用的主动视觉系统, 应该包括摄像机标定和结构光标定两部分, 因此, 在总结完他们各自的标定方法后, 经过分析研究, 提出了一种改进的主动视觉系统内参数标定方法, 这种内参数标定方法可以同时标定出摄像机参数与单目结构光参数, 为了验证这种改进的内参数标定方法, 从原理上对其进行了理论推导, 本章的最后, 将这种改进的标定方法应用于本文所设计的圆柱形焊接机器人上进行了实验验证, 并对实验数据进行了误差分析。

第4章 主动视觉系统手眼标定

本章将讨论全文的重点：手眼标定技术^[41-51]。首先来说明一下手眼系统的模型，如图 1.1 所示，将视觉系统运用于工业机器人时，为了便于观测，会将摄像机固定安装在机器人手臂的末端执行器上，即采用 Eye-in-Hand 的模式^[52]。其目的是让摄像机能随着机器人的转动而转动，机器人末端执行器运动到哪摄像机就能跟着运动到哪，方便给工业机器人提供时时的位置信息^[53-54]。对于在运动过程中采集到的位置信息，都是经过摄像机采集，存在于摄像机坐标系下的。然而对于控制器而言，他的控制量都是以机器人本体坐标系为基准的，也就是说摄像机采集到的位置信息并不能直接成为机器人的控制量，他们的基准是不一样的。假设我们选定一个世界坐标系作为基准，不失一般性的选取机器人本体坐标系作为世界坐标系。由于机器人手臂的运动是可知的，可直接从控制器中读出，如果我们还知道摄像机坐标系相对于机器人手臂的方位，那么摄像机坐标系下的坐标就可以转化为机器人手臂坐标系下的坐标，进一步转化到机器人本体坐标系中，这样机器人就能从图像中读懂目标点的位置信息，准确的进行控制跟踪。实现摄像机坐标系到机器人手臂坐标系的转化过程即称为手眼标定，下面将对其技术进行研究讨论。

4.1 空间描述与变换

手眼标定涉及到大量的空间描述与变换，故本节先引入一些数学上的定义，方便后续文章的研究与讨论。

4.1.1 空间描述

对于一个空间坐标系的描述应该包括两方面的内容，一个是这个坐标系相对于参考坐标系的位置，另外一个就是这个坐标系相对于参考坐标系的姿态。只有将这两方面的内容确定下来，这个坐标系的定义才是完整的。

(1) 位置描述

对于空间中的任意一点，我们都可以很方便的在某一个坐标系中用一个三维的矢量对其进行定义。因为在空间中我们经常会定义很多的坐标系，类似于本文中有定义摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 、机械手坐标系 $O_h - X_h Y_h Z_h$ 、世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 等，因此对于空间中点的位置描述我们应该加上一些标注性的信息，以确定是在哪个坐标系中定义的。

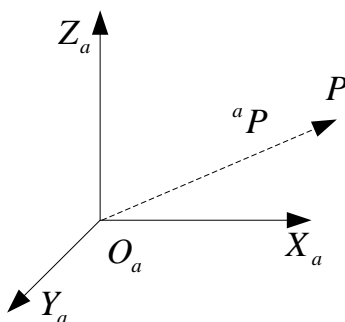


图 4.1 位置矢量示例图

假设我们建立了一个坐标系 $O_a - X_a Y_a Z_a$ ，如图 4.1 所示， P 为空间中一点。我们用 aP 表示 P 点在坐标系 $O_a - X_a Y_a Z_a$ 中的位置描述， aP 在 X_a 轴、 Y_a 轴和 Z_a 轴上的投影分别为 p_x 、 p_y 和 p_z ，则可将位置矢量 aP 写成如下形式：

$$^aP = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

(2) 姿态描述

物体不同于点，他不仅有位置信息同时自身还具有方向性，所以位置描述是不够的，这就要用到姿态描述，物体的姿态可依据物体自身的坐标系来进行描述。

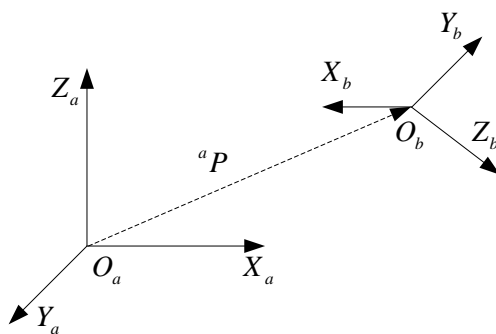


图 4.2 姿态示例图

假设我们建立了一个参考坐标系 $O_a - X_a Y_a Z_a$ ，物体坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$ ，我们用 \hat{X}_b 、 \hat{Y}_b 和 \hat{Z}_b 分别表示坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$ 各主轴方向的单位矢量。则两个坐标系的关系可表示为：

$$^aR_b = \begin{pmatrix} ^a\hat{X}_b & ^a\hat{Y}_b & ^a\hat{Z}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

其中： a_bR 表示坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$ 对坐标系 $O_a - X_a Y_a Z_a$ 的描述； ${}^a\hat{X}_b$ 、 ${}^a\hat{Y}_b$ 、 ${}^a\hat{Z}_b$ 表示 $O_b - X_b Y_b Z_b$ 各主轴单位矢量在坐标系 $O_a - X_a Y_a Z_a$ 中的描述； $r_{11} \sim r_{33}$ 表示展开后的旋转矩阵。

a_bR 称为旋转矩阵，我们可以进一步研究它的性质。将式（4-2）进行展开可得：

$${}^a_bR = \begin{pmatrix} {}^a\hat{X}_b & {}^a\hat{Y}_b & {}^a\hat{Z}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{X}_b \cdot \hat{X}_a & \hat{Y}_b \cdot \hat{X}_a & \hat{Z}_b \cdot \hat{X}_a \\ \hat{X}_b \cdot \hat{Y}_a & \hat{Y}_b \cdot \hat{Y}_a & \hat{Z}_b \cdot \hat{Y}_a \\ \hat{X}_b \cdot \hat{Z}_a & \hat{Y}_b \cdot \hat{Z}_a & \hat{Z}_b \cdot \hat{Z}_a \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

将式（4-3）进行转置运算，可得：

$${}^a_bR^T = \begin{pmatrix} \hat{X}_b \cdot \hat{X}_a & \hat{Y}_b \cdot \hat{X}_a & \hat{Z}_b \cdot \hat{X}_a \\ \hat{X}_b \cdot \hat{Y}_a & \hat{Y}_b \cdot \hat{Y}_a & \hat{Z}_b \cdot \hat{Y}_a \\ \hat{X}_b \cdot \hat{Z}_a & \hat{Y}_b \cdot \hat{Z}_a & \hat{Z}_b \cdot \hat{Z}_a \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \hat{X}_a \cdot \hat{X}_b & \hat{Y}_a \cdot \hat{X}_b & \hat{Z}_a \cdot \hat{X}_b \\ \hat{X}_a \cdot \hat{Y}_b & \hat{Y}_a \cdot \hat{Y}_b & \hat{Z}_a \cdot \hat{Y}_b \\ \hat{X}_a \cdot \hat{Z}_b & \hat{Y}_a \cdot \hat{Z}_b & \hat{Z}_a \cdot \hat{Z}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^b\hat{X}_a & {}^b\hat{Y}_a & {}^b\hat{Z}_a \end{pmatrix} = {}^b_aR \quad (4-4)$$

这表明旋转矩阵式是一个正交阵，它的逆矩阵就等于他的转置，即：

$${}^a_bR = {}^b_aR^{-1} = {}^b_aR^T \quad (4-5)$$

（3）坐标系的描述

完整的描述一个坐标系需要位置和姿态两部分信息。一个坐标系可以用它与另外一个坐标系的关系来进行描述。假设我们有两个坐标系 A 和 B ，那么对于 B 坐标系中的元素在 A 中可以表示为：

$$(B) = F \left({}^A_BR, {}^AP_{BORG} \right) \quad (4-6)$$

式中， A_BR 表示 $B \rightarrow A$ 的旋转矩阵； ${}^AP_{BORG}$ 表示 B 的原点在 A 中的位置矢量。

由上可见，只要知道两坐标系之间的关系，任何一个坐标系均可以用另一个参考坐标系描述出来。

4.1.2 空间变换

在处理不同坐标系之间的同一个量时，我们需要将坐标系之间的联系建立起来，这样才能使坐标系之间达到“共识”，这种联系也就是这里要讨论的空间变换。

（1）坐标系间的平移

当两个坐标系姿态相同的情况下，坐标系之间仅存在平移变换，如图 4.3 所示。若是我们希望以坐标系 A 来表示坐标系 B 中的空间点，可用矢量相加的方法进行处理。

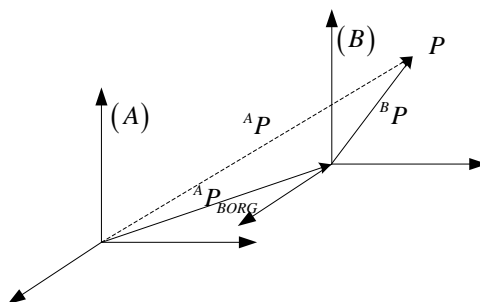


图 4.3 平移变换

假设空间中一点 P ， P 在 A 中的位置矢量为 ${}^A P$ ， P 在 B 中的位置矢量为 ${}^B P$ ，则在已知 B 坐标系的情况下可以将 ${}^A P$ 表示为如下形式：

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (4-7)$$

式中， ${}^A P_{BORG}$ 表示 B 坐标系原点相对于 A 坐标系的位置。

(2) 坐标系间的旋转

当两个坐标系原点重合时，即不存在平移的情况下，两坐标系之间的关系可仅用旋转来进行描述。

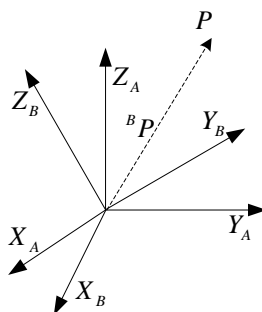


图 4.4 旋转变换

如图 4.4 所示，假设我们有两个坐标系 A 和 B ，他们的原点是重合的，用 ${}^A R_B$ 表示 $B \rightarrow A$ 的旋转矩阵，若已知空间点 P 在 B 中的描述 ${}^B P$ ，为了计算 ${}^A P$ 我们将该矢量投影到 A 坐标系中的各主轴上，得到下式：

$${}^A P_x = {}^B \hat{X}_A \cdot {}^B P, {}^A P_y = {}^B \hat{Y}_A \cdot {}^B P, {}^A P_z = {}^B \hat{Z}_A \cdot {}^B P \quad (4-8)$$

式中， ${}^B \hat{X}_A$ 表示 A 坐标系的 X 轴在 B 坐标系单位矢量方向上的投影； ${}^B \hat{Y}_A$ 表示 A 坐标系的 Y 轴在 B 坐标系单位矢量方向上的投影； ${}^B \hat{Z}_A$ 表示 A 坐标系的 Z 轴在 B 坐标系单位矢量方向上的投影。

可将上式 (4-8) 简化写成：

$${}^A P = {}^A R_B {}^B P \quad (4-9)$$

上式(4-9)即完成了一次坐标系间的旋转，表示将空间点在 B 坐标系中的描述转换成了在 A 坐标系中的描述。

(3) 坐标系间的转换

在需要使用坐标系转换的时候，往往是平移与旋转都包含的情况，这也是我们常用的一般意义下的坐标系（空间）转换。

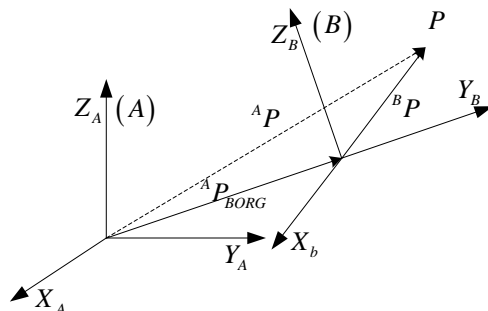


图 4.5 常见的坐标系变换

如图 4.5 所示，空间点在 B 坐标系中的描述是已知的，在 B 中有一点 P ，其位置矢量用 ${}^B P$ 表示，为转换为在 A 中的描述，可先将 B 坐标系绕其原点进行旋转，使旋转后的坐标系姿态与 A 坐标系一致，然后再将旋转后的 B 坐标系平移至 A 坐标系当前位置。若坐标系 $B \rightarrow A$ 的转换为 ${}^A R_B$ ， B 坐标系的原点在 A 中的位置矢量为 ${}^A P_{BORG}$ ，则上面的过程可用方程表示为：

$${}^A P = {}^A R_B {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (4-10)$$

上式(4-10)即表示了一般意义上的坐标系转换。有时候为了计算方便，常常会将位置矢量扩充为 4×1 矢量，如下式所示：

$$\begin{pmatrix} {}^A P \\ 1 \end{pmatrix} = {}^A T_B {}^B P = \begin{pmatrix} {}^A R_B & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^B P \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4-11)$$

式中， ${}^A T_B$ 为 4×4 矩阵，被称为齐次变换矩阵。

4.2 建立手眼关系的基本方程

假设我们在一个手眼系统中使用摄像机观察目标物体，此物体的坐标系为 C_{obj} ，我们的摄像机坐标系为 C_c ，则观察到的对于目标物体的空间描述都是在 C_c 这个坐标系下的。如果我们知道摄像机坐标系 C_c 在机械手坐标系 C_h 的空间描述，即他们之间的旋转矩阵 R 和平移 T ，就可以在机械手坐标系 C_h 准确描述出目标物体，实现跟踪控制。但由于摄像机坐标系是人眼无法观测的，所以 R 和 T 必须经过标定的方法来确定，确定 R 和 T 的过程就是手眼标定。

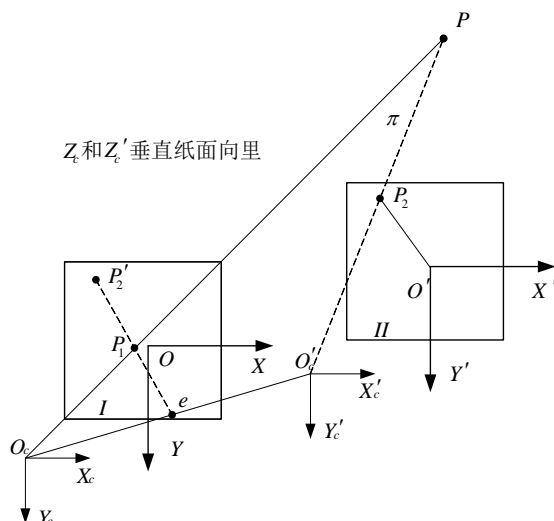


图 4.6 手眼系统运动前后各坐标系示意图

手眼标定的一般性思路是控制机械手运动，在不同的位置对同一标定物进行观测，从而推导计算出手眼系统的 R 和 T 。

如图 4.6 所示， C_{obj} 表示被观测标定物坐标系； C_{e1} 、 C_{h1} 分别表示运动前摄像机坐标系和机械手坐标系，如图位置 I ； C_{e2} 、 C_{h2} 表示运动后摄像机坐标系和机械手坐标系，如图位置 II 。在 I 和 II 位置上使用标定块对摄像机进行内外参数的标定，可得到 C_{obj} 在 C_{e1} 、 C_{e2} 中的描述，这种转换关系正如 4.1 节所说，可用 4×4 阶齐次变换矩阵进行表示，这里分别记为 A 和 B 。则 C_{e1} 和 C_{e2} 之间的关系可以描述为 $C = AB^{-1}$ ；由于机械手的运动是人为控制的，其控制量可直接从控制器中读出，所以 C_{h1} 与 C_{h2} 相对关系的描述是已知的，这里记为 D 。系统采用的是 Eye-in-Hand 的手眼关系模式，即机械手与摄像机为固定连接，其坐标系之间的关系不随机械手的变化而发生变化，是一个常量矩阵，因而不论在位置 I 还是位置 II 上， C_e 与 C_h 之间的相对关系固定不变，这里记为 X 。假设空间中有一点 P ， P 在 C_{e1} 、 C_{e2} 、 C_{h1} 、 C_{h2} 中的坐标分别为 P_{e1} 、 P_{e2} 、 P_{h1} 、 P_{h2} ，根据图 4.6 所示关系，可得：

$$P_{e1} = CP_{e2} \quad (4-12)$$

$$P_{e1} = XP_{h1} \quad (4-13)$$

$$P_{h1} = DP_{h2} \quad (4-14)$$

$$P_{e2} = XP_{h2} \quad (4-15)$$

由式 (4-12) 与 (4-15) 可得：

$$P_{e1} = CXP_{h2} \quad (4-16)$$

由式 (4-13) 与 (4-14) 可得：

$$P_{e1} = XDP_{h2} \quad (4-17)$$

将式 (4-16) 与 (4-17) 联合起来，可得到：

$$CX = XD \quad (4-18)$$

上式 (4-18) 称为手眼标定的基本方程式，其中待求解的参数为 X ，是一个 4×4 的矩阵； C 由第 3 章所述的摄像机标定得出； D 可以直接从控制器读出。

4.3 常用的手眼标定方法研究

若将手眼关系矩阵用旋转矩阵和平移向量展开，则手眼标定的基本方程式 (4-18) 可写成如下形式：

$$\begin{pmatrix} R_c & T_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_d & T_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-19)$$

将上式 (4-19) 展开后可得：

$$R_c R = R R_d \quad (4-20)$$

$$R_c T + T_c = R T_d + T \quad (4-21)$$

式中， R 表示手眼关系的旋转矩阵， T 表示手眼关系的平移向量，为未知量待求解量； R 、 R_c 、 R_d 为 3×3 正交单位矩阵。

上述等式 (4-20) 和 (4-21) 的解是不唯一的，Shiu^[55]、Tsai^[56] 用不同的方法介绍了上述手眼关系方程式解的结构和求唯一解的方法，下面对常用的手眼关系方程求解方法进行介绍。

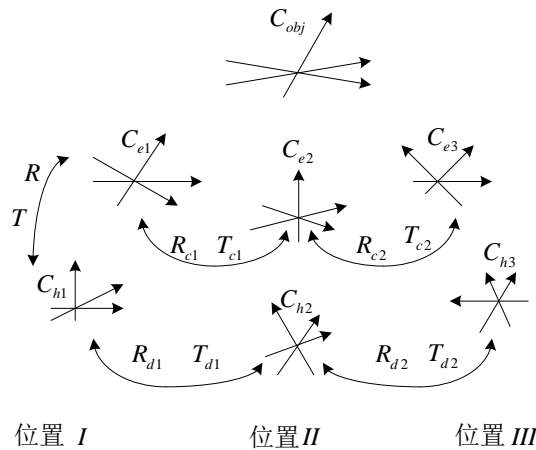


图 4.7 机械手两次运动前后各坐标系相对位置

在标定的过程中，我们控制机械手做两次运动，如图 4.7 所示。根据式 (4-20)、(4-21) 可得：

$$R_{c1} R = R R_{d1} \quad (4-22)$$

$$R_{c1}T + T_{c1} = RT_{d1} + T \quad (4-23)$$

$$R_{c2}R = RR_{d2} \quad (4-24)$$

$$R_{c2}T + T_{c2} = RT_{d2} + T \quad (4-25)$$

式中, R_{c1} 、 T_{c1} 、 R_{c2} 、 T_{c2} 为摄像机运动的参数, 可通过摄像机标定来求出; R_{d1} 、 T_{d1} 、 R_{d2} 、 T_{d2} 为机械手运动的参数, 可从机器人控制器中读出。以上均为已知量, 若要使 R 的解为唯一值, 需控制上述两次运动机械手的旋转轴不相互平行, R 的解为:

$$R = (k_{c1} \quad k_{c2} \quad k_{c1} \times k_{c2}) (k_{d1} \quad k_{d2} \quad k_{d1} \times k_{d2})^{-1} \quad (4-26)$$

式中, k_{c1} 、 k_{c2} 、 k_{d1} 、 k_{d2} 分别表示 R_{c1} 、 R_{c2} 、 R_{d1} 、 R_{d2} 决定的旋转轴的单位方向矢量。

当两次运动不是纯平移运动时, T 的解也是唯一的, 可将(4-26)解出的 R 代入(4-23)和(4-25)中, 可得到一个关于 T 的超定方程组, 然后取其中 3 个方程或者用最小二乘法均可解出平移向量 T 。

综上所述即是常用的手眼标定方法, 该方法的一般性步骤描述如下:

(1) 控制机器人手臂从位置 I 运动到位置 II , 通过控制器读出运动数据, 确定机器人手臂运动前后的空间转换关系, 记为 R_{d1} 、 T_{d1} ; 通过摄像机标定求外参数的方法确定此运动过程中摄像机坐标系之间的转换描述, 记为 R_{c1} 、 T_{c1} ; 由此可建立两个方程, 如式(4-22)和(4-23)。

(2) 控制机器人手臂从位置 II 运动到位置 III , 同样的方法建立另外两个方程, 如式(4-24)和(4-25)。

(3) 通过式(4-26)计算手眼关系矩阵 R 。

(4) 将上一步得出的手眼关系矩阵 R 代入(4-23)和(4-25)中, 计算手眼关系向量 T 。

上述方法也是传统手眼标定方法的一种, 需要在不同位置观测同一已知标定物, 然后根据图像之间的约束关系来对手眼关系方程 $CX=XD$ 进行求解。对于传统的手眼标定方法, 为提高标定精度, 总结出以下几点:

(1) 使用高精度的硬件系统来进行实验。由于机械手的运动直接影响了 D 矩阵的数值, 进而影响了整个手眼标定的结果, 所以采取高精度的硬件系统实现准确的机械手运动控制, 是提高手眼标定精度最有效的手段。

(2) 控制旋转运动的角度趋近 180° 。实验数据表明, 旋转角度越接近 180° , 手眼标定结果的抗噪声干扰能力越强, 选取一个好的旋转运动能够有效的减少噪声污染, 提

高手眼标定方法的稳定性。当然，对于不同的系统，由于视场、机械等条件的限制，可能达不到 180° ，这时应该在条件允许的范围内尽量增大旋转角。

(3) 提高图像处理的精度。在摄像机标定外参数的过程中，对于采集到的特征图像的处理直接影响了 C 矩阵的数值。提高图像处理的精度，可以有效的从源头入手，增强手眼标定算法的精确性。

(4) 采用最小二乘等降差方法对数据进行处理。最小二乘法可以有效的利用数据求最优解，对于手眼标定求解过程中产生的超定矩阵，用降差的方法可以得到更为精确的结果。

4.4 参数分离的手眼标定方法

本文针对计算机视觉工业焊接生产应用中广泛存在的手眼标定问题，提出一种基于主动视觉的机器人手眼关系标定方法。采用参数分离的方法，分别对旋转和平移矩阵进行了标定，使标定过程简洁清晰，减少了误差积累，操作简单，具有很强的实用价值。

本文所用的方法属于自标定方法的一种，为下文讨论方便，在此先引入一条自标定技术中的定理。

4.4.1 摄像机运动方向的确定

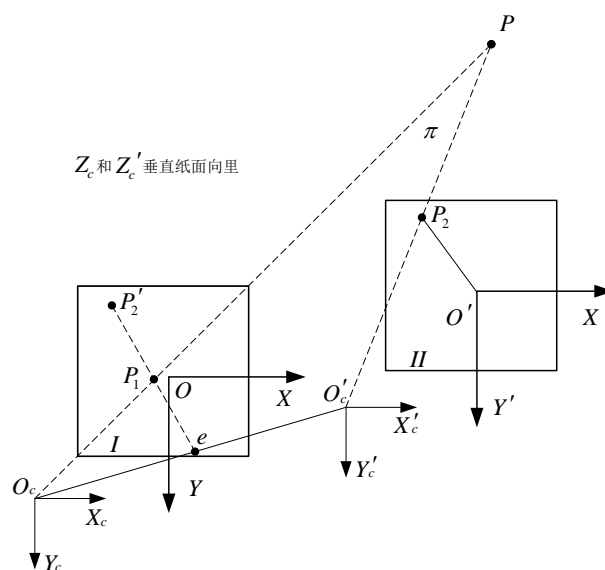


图 4.8 摄像机平移前后相对关系示意图

如图 4.8 所示， I 、 II 为摄像机平移前后获得的两幅图像， $O-XY$ 、 $O'-X'Y'$ 为图像坐标系， $O_c-X_cY_cZ_c$ 、 $O'_c-X'_cY'_cZ'_c$ 为摄像机坐标系。

假设空间中有一点 P ， P 点在图像 I 和 II 中的投影分别为 P_1 、 P_2 ，我们称 P_1 和 P_2 为一对对应点。若将图像 II 中的 P_2 挪动到图像 I 中，即按照 P_2 的坐标在图像 I 中绘制一个同坐标的 P'_2 点，我们称直线 $P_1P'_2$ 为对应点连线。

下面给出一条定理：如果摄像机做纯平移运动，则空间所有点在 I 图像上的对应点连线交于同一点 e ，而且矢量 $O_c e$ （ O_c 为摄像机在 I 处光心）为摄像机运动方向^[18]。

对这条定理的证明如下：

如图 4.8 所示，由于摄像机是纯平移运动，所以平面 I 平行于平面 II ，且 $O-XY$ 与 $O'-X'Y'$ 各轴均平行。

P'_2 与 P_2 坐标相同，故可知 OP'_2 与 $O'P_2$ 平行且相等；同时 $O_c O = O'_c O' = f$ 且 $O_c O$ 与 $O'_c O'$ 平行；两条边平行且相等可推知 $\Delta O_c OP'_2 \cong \Delta O'_c O'P_2$ 。

$O'_c P_2$ 在平面 π 上，由于 $\Delta O_c OP'_2 \cong \Delta O'_c O'P_2$ ，所以 $O_c P'_2 \parallel O'_c P_2$ ，从而可推知 P'_2 也在平面 π 上。

由于 $P'_2 P_1$ 、 $O_c O'_c$ 均在平面 π 上，且 $P'_2 P_1$ 、 $O_c O'_c$ 不平行，故他们必有一交点，设此交点为 e 。

直线 $O_c O'_c$ 与平面 I 仅有一个交点，同时由于 P'_2 、 P_1 在平面 I 上，且 e 在 $P'_2 P_1$ 上，故 e 即为此唯一交点。

由于 P 为视野中任意一点，故可知，无论 P 点空间位置如何， $P'_2 P_1$ 在平面 I 中必与 $O_c O'_c$ 交于唯一交点 e ；而且矢量 $O_c O'_c$ 为摄像机的运动方向，由于 e 在 $O_c O'_c$ 上，故矢量 $O_c e$ 同样为摄像机的运动方向。

4.4.2 旋转矩阵的标定

如图 2.9 所示，为实验所用机器人，其中共有机器人本体坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 、机器人手（末端执行器）坐标系 $O_h - X_h Y_h Z_h$ 、摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ ，这里以机器人本体坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为基准，即选为世界坐标系。三者的关系如图 4.9 所示。

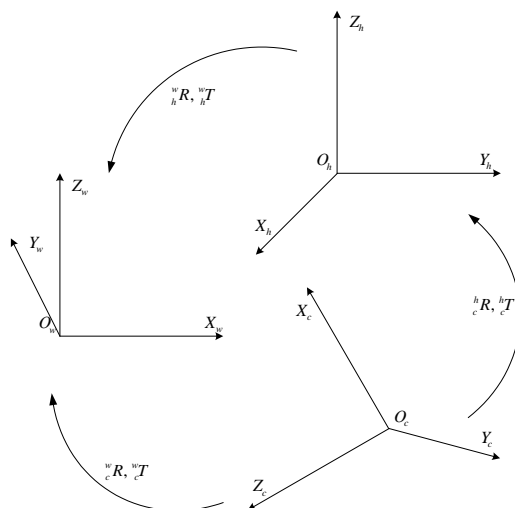


图 4.9 实验所用机器人各坐标系间的关系

假设空间中有一点 P ，用 wP 表示它在世界坐标系中的坐标，用 hP 表示它在机器人手坐标系中的坐标，用 cP 表示它在摄像机坐标系中的坐标，根据 4.1 节空间变换的内容可

知，他们三者之间的关系可以写成如下形式：

$${}^wP = {}^wR {}^hP + {}^wT \quad (4-27)$$

$${}^hP = {}^hR {}^cP + {}^hT \quad (4-28)$$

控制机械手做一次纯平移运动，设平移向量为 ka ， a 为单位方向向量。 ${}^hP'$ 为平移后 P 的机械手坐标， ${}^cP'$ 为平移后 P 的摄像机坐标。则有：

$${}^hP' = {}^hP + ka \quad (4-29)$$

由式 (4-28) 可得：

$${}^hP' = {}^hR {}^cP' + {}^hT \quad (4-30)$$

将 (4-28)、(4-29) 代入 (4-30)，可得：

$${}^hP' = {}^hP + ka = {}^hR {}^cP + {}^hT + ka = {}^hR {}^cP' + {}^hT \quad (4-31)$$

将上式 (4-31) 整理可得：

$${}^hR ({}^cP' - {}^cP) = ka \quad (4-32)$$

对 cP 、 ${}^cP'$ 使用矢量相加的方法，则 ${}^cP' - {}^cP$ 代表的意义是摄像机的运动，如图 4.8 中的 $O'P - OP = O'O$ 。用 4.4 节中介绍的摄像机运动方向的确定方法即可解得 ${}^cP' - {}^cP$ ，由于摄像机与机械手在世界坐标系中运动的数值大小是一致的，仅仅是运动的方向不同，所以不失一般性的，这里设定 ${}^cP' - {}^cP = kb$ ，其中 b 为单位方向向量。则式 (4-32) 可写为：

$${}^hRb = a \quad (4-33)$$

运用同样的方法控制机械手做纯平移运动，则可得到类似于 (4-33) 的等式，将 3 个等式组合在一起则可写成矩阵形式：

$${}^hRB = A \quad (4-34)$$

式中， B 为 3 个 b 的组合； A 为 3 个 a 的组合。

最终可得出旋转矩阵：

$${}^hR = AB^{-1} \quad (4-35)$$

4.4.3 平移向量的标定

手眼关系中的平移向量，直观意义就是摄像机坐标系原点在机械手坐标系中的描述。由于手眼关系中的旋转矩阵已经标定得到，利用这一点，设计并使用了一种虚设平移的平移向量标定方法。

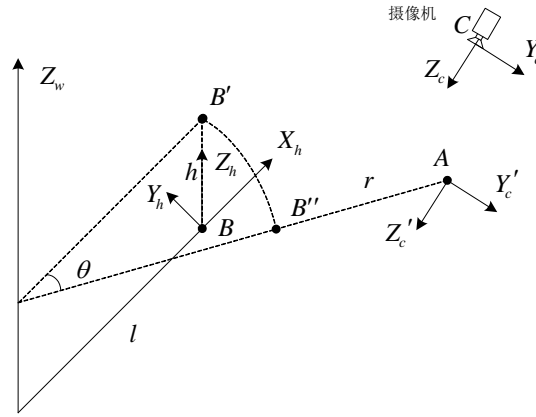


图 4.10 世界坐标系、虚设坐标系及摄像机坐标系示意图

如图 4.10 所示，假设 B 为主动视觉机器人机械手当前所在位置，此时横臂 L_1 长度为 l ；固连的摄像机在 C 位置；单目结构光系统检测到视野中有一特征点，将此特征点所处位置记为 A ；记录下 A 在摄像机坐标系下的坐标为 $(a, b, c)^T$ ，在 A 点虚设一个坐标系 $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$ ， $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$ 与 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 各坐标轴均平行同向，即两坐标系为纯平移关系；控制机械手从 B 处到达 A 处，记录下此过程中高度变化 h 、角度变化 θ 和臂长变化 r 。

假设 P 为世界坐标系中任意一点，由 4.1 节的内容可知，对于 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 、 $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$ 这两个纯平移的坐标系，存在如下的关系：

$${}^A P = {}^C P + {}^A T \quad (4-36)$$

式中， ${}^A T = (-a \ -b \ -c)^T$ ； ${}^A P$ 表示 P 在坐标系 $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$ 中的坐标； ${}^C P$ 表示 P 在坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 中的坐标。

由 (4-10) 和 (4-36) 可得：

$${}^B P = {}^B R {}^A P + {}^B T = {}^B R ({}^C P + {}^A T) + {}^B T = {}^B R {}^C P + ({}^B R {}^A T + {}^B T) \quad (4-37)$$

其中， ${}^B T = ((l+r)\cos\theta - l \quad -(l+r)\sin\theta \quad h)^T$ 。

由于坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 与坐标系 $O'_c - X'_c Y'_c Z'_c$ 为纯平移关系，不存在旋转，即：

$${}^B R = {}^B R \quad (4-38)$$

将式 (4-38) 代入 (4-37) 可得：

$${}^B P = {}^B R {}^C P + ({}^B R {}^A T + {}^B T) \quad (4-39)$$

我们可以发现,其实 B 处坐标系也就是机械手坐标系,也即 $O_h - X_h Y_h Z_h$; C 处的坐标系也就是摄像机坐标系,也即 $O_c - X_c Y_c Z_c$; 于是上式(4-39)可改写为:

$${}^h P = {}^h R {}^c P + ({}^h R {}^A T + {}^h T) \quad (4-40)$$

由(4-10)和(4-40)最终得出平移向量的求解等式:

$${}^h T = {}^h R {}^A T + {}^h T \quad (4-41)$$

4.4.4 手眼标定过程描述

运用本文设计的手眼标定方法,其总体标定过程描述如下:

(1) 控制机器人的机械手由位置 I 平移到位置 II ,将此过程中机械手的运动记录为 ka_1 , a_1 为 3×1 单位方向向量。通过图像观察对比运动前后标定靶中的特征点,根据4.4.1小节所介绍的方法确定摄像机的运动方向,记为 kb_1 , b_1 为 3×1 单位方向向量。

(2) 选择与第一次平移相垂直的方向再做一次平移,可以得到 ka_2 、 kb_2 。运用施密特正交化的方法,我们可以将 a_1 、 a_2 进行正交化,则 a_3 、 b_3 可由前两项叉乘得出,即 $a_3 = a_1 \times a_2$ 、 $b_3 = b_1 \times b_2$,最终由式(4-35)解出旋转矩阵 ${}^h R$ 。

(3) 在某一任意位置,记录下摄像机视野中一特征点 A , $A = (a \ b \ c)^T$,记录下当前机械臂长 l ,控制机械手运动,使机械手到达 A 点,记录下此过程中高度变化 h 、角度变化 θ 和臂长变化 r 。

(4) 由式(4-41)解出平移向量 ${}^h T$,至此,手眼标定全部完成。

4.5 参数分离的手眼标定方法性能分析与研究

4.5.1 参数分离的手眼标定方法性能分析

对于本文设计并使用的手眼标定方法,它的有效性将在第5章中进行实验和说明。现在从理论上对这种标定方法进行性能分析。

优点:

- (1) 不需要使用特殊的标定物,使标定方法更为实用和方便。
- (2) 使用参数分离的方法,让手眼关系更为直观明确,降低了后续误差分析和偏差补偿的难度。
- (3) 避开了解手眼关系基本方程式 $CX = XD$ 的问题,使算法更为简单,标定时间更短。
- (4) 抗干扰能力强,手眼关系中旋转矩阵与平移向量分开进行求解使得误差的相

互干扰变小，加强了系统对于干扰的稳定性。

缺点：

- (1) 选取的摄像机模型为针孔模型，没有充分考虑镜头的畸变等因素，对标定的结果有一定的影响。
- (2) 用于建立手眼关系求解方程 (4-35)、(4-41) 的仅为有限个等式，等式的精确性直接影响了手眼关系的精确性。
- (3) 参数并没有完全意义上的分离，平移向量的求解仍依赖于旋转矩阵的结果，这种依赖性使得误差会有一定程度的叠加。
- (4) 这种手眼标定方法要求机械手的运动已知，对于运动不确定的手眼系统，这种方法将不再适用。

4.5.2 平移向量 B 求法的研究

如上文所述，本文提出的手眼标定方法存在固有缺点，平移向量的标定需要使用旋转矩阵的标定结果，假设旋转矩阵的结果存在较大误差，则误差会进一步引入到平移向量的结果当中，产生误差的累积。由此可见，如果能将旋转矩阵的标定与平移向量的标定完全独立开来，理论上标定结果将得到进一步提高。

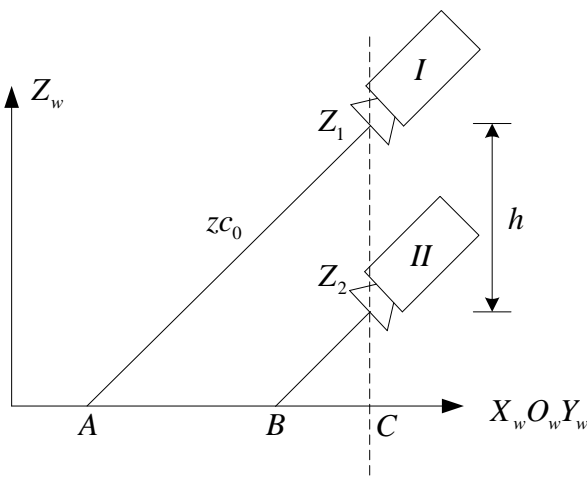


图 4.11 摄像机竖直运动位置关系

手眼关系的平移向量，即为摄像机透镜中心在机械手坐标系中的位置描述。如图 4.11 所示，假设摄像机沿着竖直方向 $Z_1 Z_2$ 运动，最终会与水平面 $(X_w O_w Y_w)$ 交于一点 C ，若是得到 C 点在机械手坐标系下的坐标，同时求出摄像机距离水平面的竖直高度 $Z_1 C$ ，则平移向量可以得出。

如图 4.11 所示，调整摄像机的高度，使结构光于水平面 $(X_w O_w Y_w)$ 通过图像中心，将此中心点记为 A ，由于使用到了单目结构光系统，且结构光通过图像中心，故 A 点在摄像机坐标系下的三维坐标已知，为 $(0 \ 0 \ z_{c_0})^T$ ；控制摄像机竖直下降高度 h ，此时

图像于水平面($X_wO_wY_w$)的中心点为 B 。

下面为求取 C 点的机械坐标, 首先证明 A 、 B 、 C 位于同一条直线上。

如图 4.11, Z_1 、 Z_2 为摄像机在不同高度下的透镜中心, Z_1Z_2 为竖直方向, 与水平面相交于 C 。设 AZ_1Z_2 为平面 L , 由于 $AZ_1 \parallel BZ_2$ (均垂直于摄像机平面), 故 BZ_2 也在平面 L 上, L 与水平面仅有一条交线, 即为 AB 。由于 C 也属于平面 L , 所以得证 A 、 B 、 C 位于同一条直线上。

由于 A 、 B 两点为水平面上点, 故而其机械坐标可视为已知, 由三角关系可得:

$$\frac{CB}{BA} = \frac{CZ_2}{Z_2Z_1} \quad (4-42)$$

其中, BA 、 Z_2Z_1 为已知量, 为计算方便可将上式改写为:

$$CZ_2 = \frac{CB}{BA} \cdot Z_2Z_1 \quad (4-43)$$

由于 Z_1C 垂直于水平面, 故而知 Z_1C 也垂直于 AC , 即 ΔACZ_1 为直角三角形, 可得:

$$AC^2 + CZ_1^2 = AZ_1^2 \quad (4-44)$$

将式(4-43)代入(4-44)可得:

$$AC^2 + h^2 \cdot \left(1 + \frac{CB}{BA}\right)^2 = AZ_1^2 \quad (4-45)$$

由式(4-45)可求出:

$$CB = \left(\sqrt{\frac{AZ_1^2 - AC^2}{h^2}} - 1 \right) \cdot BA \quad (4-46)$$

将式(4-46)代入(4-43)便可解出 CZ_2 。

由以上计算可分别得出 C 点的机械坐标和 Z_1 点的竖直距离, 故而可求出最终的平移矩阵。

从理论上说, 针对于独立求取平移向量 B 的标定方法, 其标定精度较原有方法会有所提高, 但是操作步骤较原方法会更为繁琐。将该标定方法在文中主动视觉系统中进行实验, 实验过程中需要人为的控制机械手运动到特征点上去, 因此容易引入人为误差。对比实验结果表明, 该手眼标定方法较之参数分离的手眼标定方法精确性并未明显提高, 且参数分离的手眼标定方法更为简单, 适用的环境、场合更加广泛, 故而 4.4 节所述的参数分离的手眼标定方法更为理想, 下一章将针对这种标定方法进行实验和误差分析。

4.6 本章小结

本文作为全文的重点章节，重点讨论了手眼标定技术的相关内容。首先从数学上给出了空间描述与空间变换的方法，并将手眼标定问题转化为了定量的计算，建立起了手眼关系的基本方程式。然后对于常用的一些手眼标定方法进行了介绍，对其中较为经典的一种传统手眼标定方法进行了详细研究，对于他的原理、一般性步骤进行了归纳总结，并提出了误差控制和提高精度的方法。提出了本文研究的手眼标定方法，首先从原理上对这种标定方法进行了理论分析，在验证完标定方法的可靠性后，总结了这种标定方法的一般性步骤，并参照传统的标定方法对其性能进行了对比。本章的最后给出了提高标定精度的改进方法，并对改进前后的两种方法进行了对比分析。

第5章 主动视觉系统手眼标定实验

5.1 手眼标定实验的实验设备与计算环境

实验所用机器人采用焊接领域中较常用的圆柱形模型，实物及模型如图 2.9 所示，圆柱形焊接机器人可绕中心转轴 O_1O_2 带动整个机械旋转，旋转角度的大小可控可知，在主旋转轴上垂直安装可自由伸缩的臂 L_1 ， L_1 的长度由激光测距仪精确测量出，且 L_1 伸缩的距离可控可知，在臂 L_1 的末端安装有可自由升降的臂 L_2 ， L_2 与 O_1O_2 平行，升降的距离可控可知， L_2 的底部悬挂焊枪，同时在臂 L_2 上安装有线结构光系统，线结构光系统与焊枪为固定连接，随臂 L_2 的升降而升降，但相对位置不随空间位置的变化而变化。

我们先对实验所用的圆柱形机器人各个坐标系做一些说明与定义，如下所示。

(1) 机械手坐标系

假设焊枪尖点为 O_h ，以焊枪尖点 O_h 为坐标系原点建立机械手（手）坐标系 $O_h - X_h Y_h Z_h$ ，过 O_h 点做臂 L_1 的平行线，将伸出的方向定义为 X_h 轴，过 O_h 做 O_1O_2 的平行线，竖直向上为 Z_h 轴，根据右手定则确定 Y_h 轴。

(2) 世界坐标系

这里选定机器人本体坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 作为世界坐标系。以旋转轴 O_1O_2 上一点 O_w 为世界坐标系原点，不失一般性的，我们可以假设 O_w 与 O_h 在同一水平面上，这样可以为后续计算带来方便。过 O_w 点竖直向上为 Z_w ，选定任意一位置为圆柱形焊接机器人初始位置，过 O_w 点做臂 L_1 的平行线，将伸出的方向定义为 X_w 轴，根据右手定则确定 Y_w 轴，此为我们定义的直角坐标形式的世界坐标系。考虑到机械模型为圆柱型，定义一个柱坐标的世界坐标系 $O_w - R_w \theta_w Z_w$ 。 Z_w 不变，我们将空间中任意一点 P 投射到 Z_w 的距离定义为 R_w ，与初始位置相比，臂 L_1 顺时针旋转过的角度定义为 θ_w ，此为柱坐标形式的世界坐标系，如图 5.1 所示。

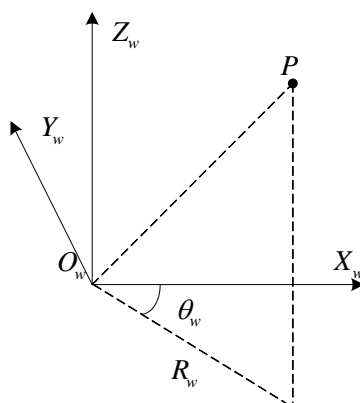


图 5.1 柱坐标系与直角坐标系相对关系示意图

由上述定义可知，柱坐标系 $O_w - R_w \theta_w Z_w$ 与直角坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 之间的转换关系如下：

$$\begin{cases} R_w = (X_w^2 + Y_w^2)^{1/2} \\ \theta_w = \arctan(-\frac{Y_w}{X_w}) \\ Z_w = Z_w \end{cases} \quad (5-1)$$

其中，旋转角 θ_w 限定在 $[0, 2\pi]$ ，为一个整圆周。

(3) 摄像机坐标系

摄像机选用针孔模型，即设定摄像机的光轴通过透镜中心，以透镜的中心 O_c 为摄像机坐标系的原点，定义光轴为 Z_c ， X_c 、 Y_c 轴分别与图像坐标系中的 u 、 v 轴平行同向，以此定义出摄像机（眼）坐标系。

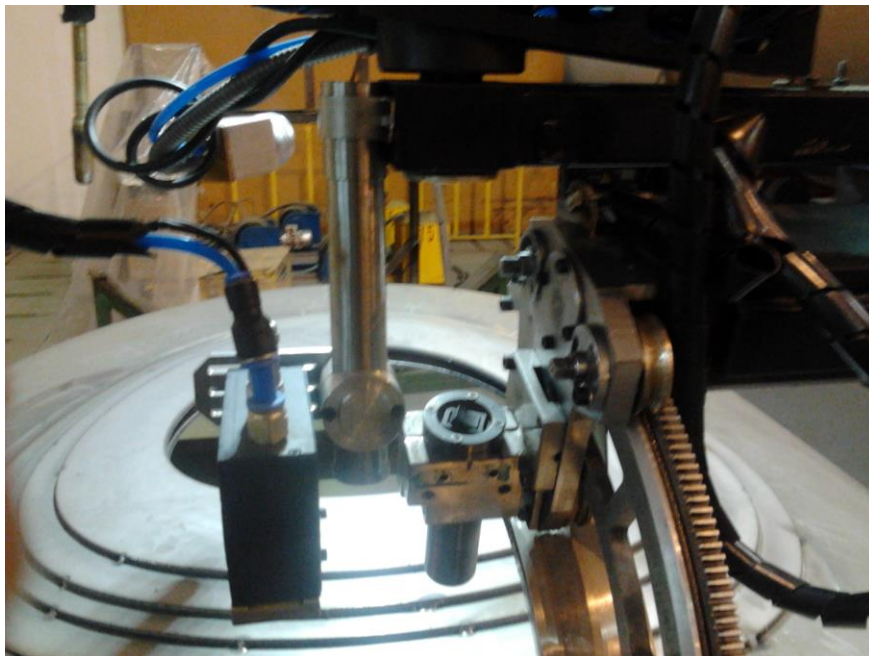


图 5.2 圆柱型主动视觉焊接机器人视图

下文为表示和计算方便，各坐标系均使用直角坐标系。如图 5.2 所示为本文设计的圆柱形主动视觉焊接机器人，后续的实验与跟踪将在该机器人下进行。

对于视觉系统内参数的标定，我们采用 3.6 节所介绍的方法进行，这里仅使用已标定完的结果进行后续手眼标定实验，视觉系统内参数标定结果如表 5.1 所示：

表 5.1 视觉系统内参数

图像像素	图像中心	dx	dy	f	b	θ / rad
768×576	(384, 288)	0.0086	0.0083	26.885529	76.307026	1.338381

5.2 手眼标定实验的实验过程与实验结果

5.2.1 旋转矩阵的实验与计算

如图 5.3 所示，为我们实验所使用的标定靶，在 A4 纸上打印 2 个实心圆点即可，图中两圆点间的最短距离为 20mm。

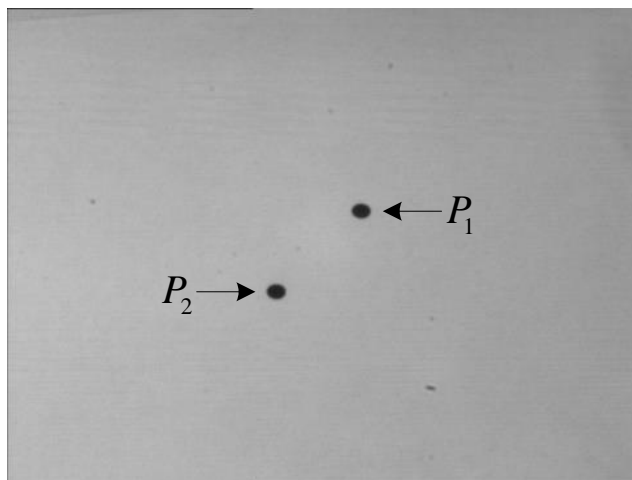


图 5.3 两圆点标定靶

如 4.4 节所述方法，控制机械手沿 $Z_h +$ 方向移动 5mm，通过图像处理得出： P_1 在移动前后的图像坐标分别为 (328.924, 324.272)、(328.881, 354.028)； P_2 在移动前后的图像坐标分别为 (436.592, 247.101)、(435.117, 277.211)。由此可以解出对应的摄像机运动量为 $(0.015364 \quad -0.565784 \quad -0.824411)^T$ 。

控制机械手沿 $X_h +$ 方向移动 5mm，同样的方法可以得到 P_1 、 P_2 在移动后的图像坐标分别为 (323.868, 313.132)、(429.263, 237.683)。由此可以得到对应的摄像机运动量，将此运动量与 $(0.015364 \quad -0.565784 \quad -0.824411)^T$ 进行正交化，得到的摄像机运动为 $(0.114094 \quad 0.820115 \quad -0.560770)^T$ 。

如 4.4.4 小节所述，我们可以将机械手的前两次垂直运动进行单位正交化，然后又乘可以得到第三次运动为 $(0 \quad 1 \quad 0)^T$ ，我们可以将这三次运动用矩阵形式表示出来，如下：

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

其中， A 表示机械手运动矩阵。

同样的方法可以得到摄像机的第三次运动为 $(0.993351 \quad -0.085445 \quad 0.077153)^T$ ，将三次摄像机运动表示成矩阵形式如下：

$$B = \begin{pmatrix} 0.015364 & 0.114094 & 0.993351 \\ -0.565784 & 0.820115 & -0.085445 \\ -0.824411 & -0.560709 & 0.077153 \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

其中， B 表示摄像机运动矩阵。

由于 B 矩阵为单位正交阵，则依据单位正交阵的属性我们可以得到：

$$B^{-1} = B^T \quad (5-4)$$

则由 (4-35)、(5-2)、(5-3)、(5-4) 我们可以解得：

$${}^h_c R = \begin{pmatrix} 0.114094 & 0.820115 & -0.560709 \\ 0.993351 & -0.085445 & 0.077153 \\ 0.015364 & -0.565784 & -0.824411 \end{pmatrix} \quad (5-5)$$

同样的方法再控制机械手沿 $Z_h -$ 、 $X_h +$ 、 $Z_h +$ 、 $X_h -$ 、 $Z_h -$ 、 $X_h -$ 方向移动 $5mm$ ，每两次运动就可以确定一个 ${}^h_c R$ ，现将所有的计算结果表示出来，如表 5.2 所示。

改变机械手每次移动的距离，由原来的每次移动 $5mm$ 增加为每次移动 $10mm$ ，实验的结果如表 5.3 所示。

表 5.2 旋转矩阵的多次实验结果与误差

	A_i	B_i	${}^h_c R$	最大偏差
i=1	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.015364 & 0.114094 & 0.993351 \\ -0.565784 & 0.820115 & -0.085445 \\ -0.824411 & -0.560709 & 0.077153 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.114094 & 0.820115 & -0.560709 \\ 0.993351 & -0.085445 & 0.077153 \\ 0.015364 & -0.565784 & -0.824411 \end{pmatrix}$	0.019487
i=2	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.013032 & 0.112708 & -0.993543 \\ 0.673031 & 0.735838 & 0.074646 \\ 0.739499 & -0.667713 & -0.085446 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.112708 & 0.735838 & -0.667713 \\ 0.993543 & -0.074646 & 0.085446 \\ 0.013032 & -0.673031 & -0.739449 \end{pmatrix}$	0.087986
i=3	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.015160 & -0.109808 & -0.993837 \\ -0.566776 & -0.819788 & 0.081932 \\ -0.823732 & 0.562041 & -0.074665 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.109808 & 0.819788 & -0.562041 \\ 0.993837 & -0.081932 & 0.074665 \\ 0.015160 & -0.566776 & -0.823732 \end{pmatrix}$	0.018269
i=4	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.013860 & -0.106973 & 0.994165 \\ 0.534590 & -0.841022 & -0.083042 \\ 0.844998 & 0.530320 & 0.068843 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.106973 & 0.841022 & -0.530320 \\ 0.994165 & -0.083042 & 0.068843 \\ 0.013860 & -0.534590 & -0.844998 \end{pmatrix}$	0.050455
平均			$\begin{pmatrix} 0.110896 & 0.804191 & -0.580196 \\ 0.993724 & -0.081266 & 0.076527 \\ 0.014354 & -0.585045 & -0.808160 \end{pmatrix}$	0.044049

表 5.3 增加移动量后的旋转矩阵实验结果与误差

	A_i	B_i	${}^h_c R$	最大偏差
i=1	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.012627 & 0.108970 & 0.993965 \\ -0.547959 & 0.832249 & -0.084280 \\ -0.836410 & -0.543587 & 0.070220 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.108970 & 0.832249 & -0.543587 \\ 0.993965 & -0.084280 & 0.070220 \\ 0.012627 & -0.547959 & -0.836410 \end{pmatrix}$	0.025951
i=2	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.014027 & 0.098432 & -0.995045 \\ 0.560539 & 0.824842 & 0.073694 \\ 0.828009 & -0.556728 & -0.066745 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.098432 & 0.824842 & -0.556728 \\ 0.995045 & -0.073694 & 0.066745 \\ 0.014027 & -0.560539 & -0.828009 \end{pmatrix}$	0.013159
i=3	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.015462 & -0.107315 & -0.994105 \\ -0.583505 & -0.808337 & 0.078185 \\ -0.811963 & 0.578856 & -0.075118 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.107315 & 0.808337 & -0.578856 \\ 0.994105 & -0.078185 & 0.075118 \\ 0.015462 & -0.583505 & -0.811963 \end{pmatrix}$	0.009807
i=4	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.015030 & -0.095167 & 0.995348 \\ 0.602789 & -0.795089 & -0.066918 \\ 0.797759 & 0.598979 & 0.069316 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.095167 & 0.795089 & -0.598979 \\ 0.995348 & -0.066918 & 0.069316 \\ 0.015030 & -0.602789 & -0.797759 \end{pmatrix}$	0.029441
平均			$\begin{pmatrix} 0.102471 & 0.815129 & -0.569538 \\ 0.994616 & -0.075769 & 0.070350 \\ 0.014287 & -0.573698 & -0.818535 \end{pmatrix}$	0.019590

由表 5、表 6 可以看出，实验的结果有一定程度的波动，分析其原因很可能是机械的运动不能保证严格意义上的正交造成的。具体考虑到有两点可能性：第一，机械的安装缺陷；第二，当机械臂换向运动时触发了前一运动的回程。对于第一点，机械是由专人设计和安装的，垂直度较高，可忽略其影响。对于第二点，由于机械在运动过程中会有振动等干扰，特别是电机刚刚启动时较为严重，因而其可能性较大。为验证第二点想法，同时也为提高标定的精度，再次进行了实验。

为减少机械的回程，实验过程保持机械朝一个方向运动，首先控制机械手从 $X_h -$ 朝 $X_h +$ 方向进行移动，每隔 10mm 采集一副图像；再控制机械手从 $Z_h -$ 朝 $Z_h +$ 方向进行移动，每隔 10mm 采集一副图像。实验的结果如表 5.4 所示。

如表 5.4 所示，采用消除回程的方法使实验误差大幅度降低，实验结果证明了这种标定方法的正确性与稳定性。

对于标定靶中圆点的大小、圆点之间的距离这两个设定因素，曾经进行过更改与实验，实验的结果没有显示什么规律性，故不对其进行讨论。

表 5.4 消除回程后的旋转矩阵实验结果与误差

	A_i	B_i	${}^h_c R$	最大偏差
i=1	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.014392 & 0.102564 & 0.994622 \\ -0.592490 & 0.802158 & -0.074144 \\ -0.805449 & -0.588237 & 0.072313 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.102564 & 0.802158 & -0.588237 \\ 0.994622 & -0.074144 & 0.072313 \\ 0.014392 & -0.592490 & -0.805449 \end{pmatrix}$	0.003542
i=2	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.013512 & 0.102603 & -0.994631 \\ 0.588159 & 0.805253 & 0.075077 \\ 0.808632 & -0.583987 & -0.071228 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.102603 & 0.805253 & -0.583987 \\ 0.994631 & -0.075077 & 0.071228 \\ 0.013512 & -0.588159 & -0.808632 \end{pmatrix}$	0.003503
i=3	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.014392 & -0.109680 & -0.993863 \\ -0.592490 & -0.801607 & 0.079884 \\ -0.805449 & 0.587704 & -0.076521 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.109680 & 0.801607 & -0.587704 \\ 0.993863 & -0.079884 & 0.076521 \\ 0.014392 & -0.592490 & -0.805449 \end{pmatrix}$	0.003574
i=4	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.013512 & -0.109577 & 0.993886 \\ 0.588159 & -0.804706 & -0.080724 \\ 0.808632 & 0.583473 & 0.075323 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.109577 & 0.804706 & -0.583473 \\ 0.993886 & -0.080724 & 0.075323 \\ 0.013512 & -0.588159 & -0.808632 \end{pmatrix}$	0.003471
平均			$\begin{pmatrix} 0.106106 & 0.803431 & -0.585850 \\ 0.994251 & -0.077457 & 0.073846 \\ 0.013952 & -0.590325 & -0.807041 \end{pmatrix}$	0.003523

5.2.2 平移向量的实验与计算

由表 5.2、表 5.3、表 5.4 的数据可以看出，消除回程后的实验最为成功，实验结果的波动最小，故选取表 5.4 的数据作为旋转矩阵的有效结果来进行后续平移向量的实验。

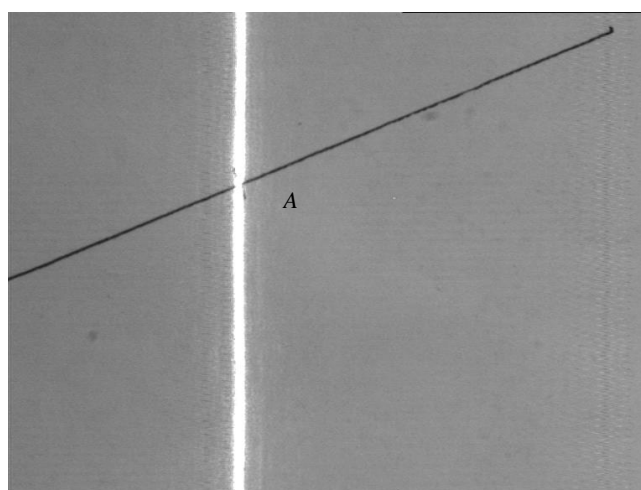


图 5.4 特征点的二维图像

如图 5.4 所示，图中的黑线为摄像机视野中一特征线条，线激光照射在视野内与黑

线形成交点，设交点为 A ，通过图像处理及转换得出 A 点在摄像机坐标系中的坐标为 $(-9.56145 \ -6.96446 \ 281.993)^T$ 。

此时机械臂 L_1 的长度为 543mm ，控制机械手运动到 A 点，此运动过程的控制量为：半径改变量 $r = 21.8\text{mm}$ ；角度改变量 $\theta = 0.1274\text{rad}$ ；高度改变量 $h = -100.2\text{mm}$ 。根据式 (4-41)，我们可以由表 5.4 中的 ${}^h_c R$ 计算出相应的 ${}^h_c T$ ，具体结果如表 5.5 中所示。

表 5.5 针对 A 点得出的平移向量实验结果与误差

	L_1	r	θ/rad	h	${}^h_c R$	${}^h_c T$	最大偏差
i=1	543	21.8	0.1274	-100.2	$\begin{pmatrix} 0.102564 & 0.802158 & -0.588237 \\ 0.994622 & -0.074144 & 0.072313 \\ 0.014392 & -0.592490 & -0.805449 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 189.668 \\ -83.1641 \\ 122.942 \end{pmatrix}$	0.6300
i=2	543	21.8	0.1274	-100.2	$\begin{pmatrix} 0.102603 & 0.805253 & -0.583987 \\ 0.994631 & -0.075077 & 0.071228 \\ 0.013512 & -0.588159 & -0.808632 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 188.491 \\ -82.8646 \\ 123.862 \end{pmatrix}$	0.7585
i=3	543	21.8	0.1274	-100.2	$\begin{pmatrix} 0.109680 & 0.801607 & -0.587704 \\ 0.993863 & -0.079884 & 0.076521 \\ 0.014392 & -0.592490 & -0.805449 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 189.582 \\ -84.3981 \\ 122.942 \end{pmatrix}$	0.7750
i=4	543	21.8	0.1274	-100.2	$\begin{pmatrix} 0.109577 & 0.804706 & -0.583473 \\ 0.993886 & -0.080724 & 0.075323 \\ 0.013512 & -0.588159 & -0.808632 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 188.409 \\ -84.0657 \\ 123.862 \end{pmatrix}$	0.6290
平均					$\begin{pmatrix} 0.106106 & 0.803431 & -0.585850 \\ 0.994251 & -0.077457 & 0.073846 \\ 0.013952 & -0.590325 & -0.807041 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 189.038 \\ -83.6231 \\ 123.402 \end{pmatrix}$	0.6981

更换机械臂 L_1 的长度，提取摄像机视野中的另一特征点 B ， B 点在摄像机坐标系下的坐标为 $(-14.0506 \ 17.0521 \ 263.026)^T$ ，针对 B 点再次进行实验，实验的结果如表 5.6 所示。

由表 5.5、表 5.6 可以看出，实验得出的平移向量 ${}^h_c T$ 比较稳定，最大误差也在 0.8mm 以内，故最终选取表 5.6 中的平均结果作为实验结果，即焊接机器人主动视觉手眼标定的结果为：

$${}^h_c R = \begin{pmatrix} 0.106106 & 0.803431 & -0.585850 \\ 0.994251 & -0.077457 & 0.073846 \\ 0.013952 & -0.590325 & -0.807041 \end{pmatrix} \quad (5-6)$$

$${}^h_c T = \begin{pmatrix} 188.861 \\ -83.4267 \\ 123.635 \end{pmatrix} \quad (5-7)$$

表 5.6 针对 B 点得出的平移向量实验结果与误差

	L_1	r	θ / rad	h	${}^h_c R$	${}^h_c T$	最大偏差
i=1	490	52.8	0.1466	-98.9	$\begin{pmatrix} 0.102564 & 0.802158 & -0.588237 \\ 0.994622 & -0.074144 & 0.072313 \\ 0.014392 & -0.592490 & -0.805449 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 189.461 \\ -83.0746 \\ 123.259 \end{pmatrix}$	0.6000
i=2	490	52.8	0.1466	-98.9	$\begin{pmatrix} 0.102603 & 0.805253 & -0.583987 \\ 0.994631 & -0.075077 & 0.071228 \\ 0.013512 & -0.588159 & -0.808632 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 188.291 \\ -82.7732 \\ 124.010 \end{pmatrix}$	0.6535
i=3	490	52.8	0.1466	-98.9	$\begin{pmatrix} 0.109680 & 0.801607 & -0.587704 \\ 0.993863 & -0.079884 & 0.076521 \\ 0.014392 & -0.592490 & -0.805449 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 189.430 \\ -84.0944 \\ 123.259 \end{pmatrix}$	0.6677
i=4	490	52.8	0.1466	-98.9	$\begin{pmatrix} 0.109577 & 0.804706 & -0.583473 \\ 0.993886 & -0.080724 & 0.075323 \\ 0.013512 & -0.588159 & -0.808632 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 188.263 \\ -83.7644 \\ 124.010 \end{pmatrix}$	0.5980
平均					$\begin{pmatrix} 0.106106 & 0.803431 & -0.585850 \\ 0.994251 & -0.077457 & 0.073846 \\ 0.013952 & -0.590325 & -0.807041 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 188.861 \\ -83.4267 \\ 123.635 \end{pmatrix}$	0.6298

5.3 实验数据分析

5.3.1 准确性分析

为了判断标定结果的可靠性与准确性，在标定完成的主动视觉焊接机器人上进行了模拟的点跟踪实验。在摄像机视野内标识出几个已知的特征点，根据标定出的手眼关系，由式 (4-10) 与 (5-1) 计算出相应的控制量，并控制机械手进行跟踪。跟踪效果如图 5.5 所示。

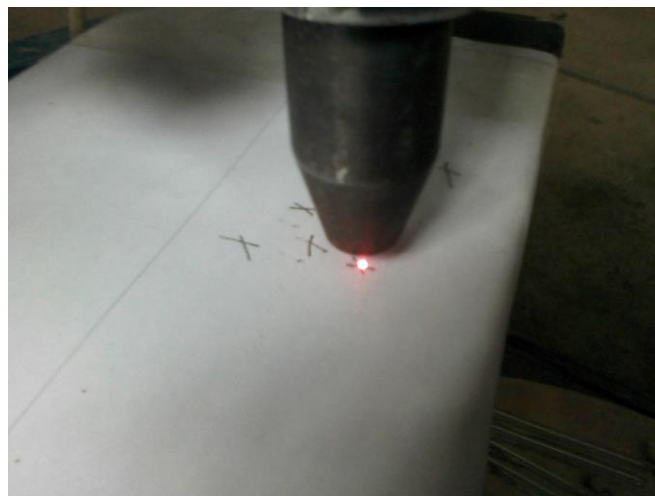


图 5.5 实际跟踪效果视图

计算出的控制量与实际的控制量如表 5.7 所示。

表 5.7 计算控制量与实际控制量 mm

L_1 臂长	特征点 图像坐标	实际控制量			计算控制量		
		$r_{\text{实}}$	$\theta_{\text{实}}$	$h_{\text{实}}$	$r_{\text{标}}$	$\theta_{\text{标}}$	$h_{\text{标}}$
300	(108,134)	50.5	14.2	-60.0	50.794	14.16	-59.563
	(122,460)	68.0	13.6	-76.0	67.774	13.63	-76.253
	(620,144)	-101.0	3.3	-246.0	-101.25	3.263	-245.47
	(570,504)	-36.5	6.1	-240.0	-36.108	6.173	-240.50
350	(114,120)	48.0	12.4	-60.0	47.734	12.39	-60.042
	(134,500)	67.0	12.0	-81.0	67.274	11.90	-80.420
	(583,166)	-79.0	4.6	-222.0	-78.989	4.585	-222.06
	(588,498)	-44.0	4.5	-252.0	-44.697	4.493	-252.21

根据表 5.7 中的数据，可以计算出点跟踪实验中真实控制量与计算控制量之间的误差，具体的计算结果如表 5.8 所示。

表 5.8 计算控制量与实际控制量误差 mm

	1	2	3	4	5	6	7	8	平均	方差
Δr	0.294	-0.226	-0.250	0.392	-0.266	0.274	0.011	-0.697	-0.0585	0.1198
$\Delta \theta$	-0.04	0.030	-0.037	0.073	-0.010	-0.10	-0.015	-0.007	-0.0133	0.0023
Δh	0.437	-0.253	0.530	-0.50	-0.042	0.580	0.060	-0.210	0.0753	0.1408

从表 5.8 中可以看出，数据的平均误差与方差都比较小，最大的位置跟踪误差在 0.7mm 以内，最大的角度跟踪误差在 0.1° 以内，均在工业容许的误差范围之内，标定出来的结果可以很好的实现跟踪，也即手眼标定的结果是准确有效的。为验证算法是否普遍有效，改变摄像机的位置与姿态重新进行标定并进行点跟踪实验，实验的结果依旧准确有效，从而从普遍意义上说明了这种手眼标定算法的可靠性与准确性。

5.3.2 误差分析

将表 5.2 与表 5.3 的结果进行对比，会发现增大移动距离后旋转矩阵的偏差小了很多，偏差的波动也有所减小。进而对比表 5.3 与表 5.4，发现在无机械回程的情况下，偏差进一步减小，且偏差基本保持一个平稳的数值。由以上几点出发，做出以下几点猜想：

- (1) 偏差主要来自两个方面：机械、图像处理。
- (2) 机械对结果带来的影响远大于图像处理。
- (3) 图像处理对结果带来的影响基本保持在一个数量级。

对于第一点，仔细考虑偏差的来源主要有：噪声、现场环境、机械回程、机械振动、

图像模糊、镜头畸变。我们将机械回程与机械振动综合为一点，也就是机械干扰；我们将噪声、现场环境、图像模糊、镜头畸变等综合为一点，也就是图像处理。这是从最终效果上对他们进行划分的。

对于第二点，从表 5.3 与表 5.4 的对比上来看，未经过消除回程的（手眼标定）最小偏差为 $0.009807mm$ ，经过消除回程以后的（手眼标定）最大偏差为 $0.003471mm$ ，对比之下前者最小值是后者最大值的 3 倍，由此可以说明机械引入的偏差远大于图像处理。

另外，如图 5.3 所示激光线条与背景黑线，经过测试发现：每抬高或降低机械手 $1mm$ ，图像中的激光线沿 X 轴方向大约移动 4 个像素；图像中的黑线沿 Y 轴方向大约移动 7 个像素。假设机械的误差源仅有机械回程，一般机械的回程都能达到 $0.2 \sim 0.5mm$ ，则对应的图像会有 X 方向上的 $1 \sim 2$ 个像素偏差、 Y 方向上的 $1.5 \sim 3.5$ 个像素偏差。对于本文使用的摄像机，特征点提取过程较为精确，一般情况下，处理出的特征点位置偏差不会超过 1 个像素。从这方面同样可以看出机械造成的影响是比图像处理的影响更大的。

对于第三点，从表 5.4 可以看出，此时的偏差基本上是图像处理造成的，而最后计算出的偏差值基本保持在 $0.0035mm$ 附近，这就证明了第三点。此外，对于图像处理，算法是比较固定的，处理的特征线条在图像中的位置、形状也是基本不变的，因而处理出的结果如果有偏差，偏差也应该是在同一数量级内基本不变。

5.4 本章小结

本章为实验验证环节，主要是为了通过具体实验验证第 4 章提出的手眼标定算法的有效性。首先，对于实验所用的设备进行了介绍，并将其量化成为数学模型。然后对于手眼关系中的旋转矩阵和平移向量分别进行了实验。通过改变移动量和改变移动方式对旋转矩阵进行了多次实验，通过测试多点对平移向量进行了多次实验，将多次实验的结果真实的记录并计算出最终的手眼关系。最后通过多次的实验与模拟跟踪对这种手眼标定方法的准确性与稳定性进行了定性、定量的分析，最终的验证结果证明了这种标定方法是可用的。

结 论

本课题来源于实际的科研项目，针对计算机视觉工业焊接生产应用中广泛存在的手眼标定问题，力求突破传统的手眼标定方法的繁琐标定过程及摆脱自标定方法解的不稳定性，结合两者的优点，提出一种更加适合工业运用的简单的手眼标定方法。本文的主要研究工作和所得结论有以下几点：

(1) 深入的研究了摄像机标定方法、单目结构光系统标定方法及主动视觉系统手眼标定方法。对各种摄像机模型进行了研究，针对非线性模型详细介绍了张正友提出的基于 2D 平面靶的摄像机标定方法。对单目结构光系统进行了定量分析，并深入研究了单目结构光系统的测量原理。

(2) 单目结构光系统能有效的实现焊接机器人的测量、导向功能。通过对单目结构光系统的分析研究，基于“消隐点”思想提出了改进的主动视觉系统内参数标定方法。利用两次摄像机移动相对高度差，避开了视觉测量中的深度问题；仅用一次标定即可同时得出摄像机参数和单目结构光系统参数，缩短了标定的时间；利用最小二乘法对实验数据进行拟合，匹配出最佳直线。实现了空间中任意点的三维坐标测量。将该内参数标定方法用到本文所设计的圆柱形焊接机器人系统中，通过实验，对本文提出的内参数标定方法进行比对测定，参数的相对误差均小于 10^{-2} ，文中讨论方法可满足实用要求，标定精度达到工业标准。

(3) 文中所设计的主动视觉系统主要应用于工业焊接，鉴于其应用领域，提出了一种主动视觉系统手眼标定方法。采用参数分离的方式，分别对旋转矩阵和平移向量进行了标定。以两平面点作为标定靶，控制机械手做纯平移运动，利用图像中特征点产生的相应变化确定摄像机的运动，进而通过文中参数分离的手眼标定算法方便快速的实现了旋转矩阵的标定。使用虚拟坐标系作为桥梁，仅需控制机械手做一次特定运动便可对平移向量进行标定，解决了平移向量无法单独确定的问题。整体标定过程清晰，操作简单，具有很强的实用价值。将该手眼标定方法用到本文所设计的圆柱形焊接机器人系统中，通过实验分析，证明了该算法的稳定性和准确性，且该算法仅需要控制机械手做两次平移和一个特征点测量，对工作环境无特殊要求。

后续工作的展望：手眼标定是计算机视觉控制中的重点和难点问题，多年来已经有许多的研究成果，但是理论方法与实际运用中有较大的差别，在实际运用中会有较多的干扰和误差源，往往达不到理论中给出的精确结果，如何有效的排除干扰和控制误差仍需要不断的摸索。同时，手眼标定方法的通用性也一直是研究者们试图解决的问题，由于个人能力及时间的限制，本文完成的工作还很不成熟，在如下几处仍需要补充和加强：

(1) 本文提出的手眼标定方法需要控制机械运动，这中间的运动过程要求可知，

若用于运动不可知的机械设备，则这种标定方法无法达到预期的效果。

（2）由于摄像机选用的是针孔模型，从源头上就存在一定的偏差，标定过程中会有偏差的累积，对最终手眼标定的结果会有一定程度的影响。

（3）本文提出的手眼标定方法是运用于工业领域的，其通用性也是针对工业中较为常用的几种模型而言，并不是真正意义上的完全通用。

参考文献

- [1] 杨朝虹. 机器人技术的应用与发展[J]. 制造业自动化, 2006, 28:148-149.
- [2] Chan C C, Lo E W C. Visual servo control with artificial neural network. Proc. of IEEE Inter. Conf. on Industrial Technology, 1994:283-287.
- [3] Conticelli F, et al. Hybrid visual servoing: A combination of nonlinear control and linear vision. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 29(4):243-256.
- [4] 洪义平. 视频序列中运动对象的检测与跟踪[D]. 大连理工大学, 2002:28-33.
- [5] 瞿心昱. 认知机器人研究综述[C]. //2009年中国智能自动化会议, 中国自动化学会智能自动化专业委员会, 2009:718-725.
- [6] 谭一炯. 焊接机器人技术现状与发展趋势[J]. 电焊机, 2006, 36(3):6-10.
- [7] Cooperstock J R, Milios E E. Self-supervised learning for docking and target reaching. Robotics and Autonomous Systems, Vol.11, 1993:243-260.
- [8] Hager G D, Chang W C, Morse A S. Robot feedback control based on stereo vision: Towards calibration-free hand/eye coordination. In Proc. 1994 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 1994:2850- 2856.
- [9] Herve J, Sharma R, Cucka P. Toward robust vision-based control: Hand-Eye coordination without calibration. In Proc. 1991 IEEE Inter. Symp. On Intelligent Control, 1991:457-462.
- [10] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1):43-55.
- [11] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 基于立体视觉的机器人手眼无标定三维视觉跟踪[J]. 机器人, 2000, 22(4): 293-299.
- [12] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 基于神经网络的机器人手眼无标定平面视觉跟踪[J]. 自动化学报, 2001, 27(2): 194-199.
- [13] 钱江. 基于图像雅克比矩阵的机器人无标定动态手眼协调[D]. 上海交通大学, 2002:33-42.
- [14] 邱文彬. 基于自抗扰控制器的机器人无标定手眼协调[D]. 上海交通大学, 2001:35-46.
- [15] 吕游. 视觉引导技术在工业机器人智能抓取中的应用[D]. 合肥工业大学, 2009:30-38.
- [16] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005:32-40.
- [17] 方兴. 瑞利判据的适用条件[J]. 保山师专学报, 2007, 26(5):35-36.
- [18] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社,

- 1998:52-63,67-70.
- [19]温奎. 基于立体视觉的移动机器人目标定位[D]. 南京理工大学. 2006:40-46.
- [20]吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008:212-220.
- [21]田原嫫, 黄合成, 谭庆昌等. 摄像机镜头畸变的研究[J]. 计算机工程与应用. 2009, 45(26):49-52.
- [22]O.D. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. The MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [23]杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报. 2005(03):76-80.
- [24]张靖, 朱大勇, 张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. 光学学报. 2008(08):276-280.
- [25]贺俊吉, 张广军, 杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法[J]. 仪器仪表学报. 2004(05):344-347.
- [26] Y.Y.Abdel-Aziz and H.M.Karara. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. In Proc. Close-Range Photogrammetry, Jan.1971:1-18.
- [27] C C Stama, C Theurer, S W Henriksen. Manual of Photogrammetry, 4th Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, 1980:322-3328.
- [28] D B Gennery. Least-squares camera calibration including lens distortion and automatic editing of calibration points, paper presented at Workshop on Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, XVII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, D.C., 1992:560-565.
- [29] J.Salvi. An approach to coded structured light to obtain three dimensional information, Ph.D. Thesis, University of Girona, Department of Electronic, Information and Automation, 1997:77-81.
- [30] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand / eye calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3):345-358.
- [31] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992, 14(10):965-980.
- [32] Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000, 22(11):1330-1334.
- [33] S.D.Ma. A Self-Calibration Technique for Active Vision System, IEEE Trans. Robotics and Automation, Feb., 1996:114-120.
- [34]胡占义, 吴朝福. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11):1149-1156.
- [35]雷成, 吴朝福, 胡占义. 一种新的基于主动视觉系统的摄像机自标定方法[J]. 计算

- 机学报, 2002,23(11):1130-1139.
- [36] Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system. Robots and Vision 1988 Conf.Proceedings,5-13.
- [37] James K W. Noncontact machine vision metrology within a CAD coordinate system. Autofact 1988 Conference Proceedings, 9-17.
- [38] 段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法[J]. 仪器仪表学报, 21(1):108-110.
- [39] 邹定海. 三维视觉检测研究及其 ADC 应用. 天津大学[D], 1992:33-37.
- [40] Chen C H, Kak A C.1987.Modeling and calibration of a structured light scanner for 3D robot vision. Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, 807-815.
- [41] 熊春山, 黄心汉, 王敏. 手眼立体视觉的算法与实现 [J]. 机器人, 2001, 23(2):113-117.
- [42] 王学影, 刘书桂, 张洪涛, 杜建军. 基于参数分离机器人手眼视觉标定方法研究[J]. 计量学报, 2007,28(2):106-109.
- [43] 杨广林, 孔令富, 王洁. 一种新的机器人手眼关系标定方法[J]. 机器人, 2006,28 (4): 400-405.
- [44] 张云珠. 工业机器人手眼标定技术研究. 哈尔滨工程大学[D], 2009:26-39.
- [45] 刘苏宜, 王国荣, 石永华. 激光视觉机器人焊接中摄像机和手眼的同时标定[J]. 华南理工大学学报, 2008,36(2):74-77.
- [46] 王君臣, 王田苗, 杨艳. 基于无迹卡尔曼滤波的机器人手眼标定[J]. 机器人, 2011,33(5):621-627.
- [47] 王君臣, 王田苗, 杨艳. 非线性最优机器人手眼标定[J]. 西安交通大学学报, 2011,45(9):15-20.
- [48] 熊会元, 宗志坚, 高群. 一种线结构光视觉传感器手眼标定方法及仿真[J]. 系统仿真学报, 2010,22(9):2223-2226.
- [49] 许海霞, 王耀南, 万琴. 一种机器人手眼关系自标定方法[J]. 机器人, 2008,30(4):373-378.
- [50] 刘畔畔, 李庆春. 矩阵方程 $AX+XB=C$ 的对称解及其最佳逼近[J]. 江西师范大学学报, 2009, 33(1):17-20.
- [51] 王颖, 董再励. 一种基于线性模型的机器人手眼标定新方法[J]. 模式识别与人工智能, 2005, 18(4):491-495.
- [52] 肖南峰. 工业机器人[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011:44-58.
- [53] 克莱格 (美). 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:26-35.

- [54] 陈善本, 林涛. 智能化焊接机器人技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:33-50.
- [55] Y.C.Shui and S.Ahmad. Calibration of Wrist-Mounted Robotic Sensors by Solving Homogenous Transform Equations of the Form $AX=XB$, IEEE Trans.Robotics and Automation, 1989, 5(1):16-29.
- [56] R.Y.Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, Proc. of IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, 1986, 364-374.

攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1] 陈虹丽, 王武升. 一种简易的线结构光系统的标定方法. 哈尔滨工程大学自动化学院学术会议论文集, 2012.5.

致 谢

首先衷心地感谢我的导师王宗义教授和陈虹丽教授，本文是在两位老师的悉心指导和无私帮助下完成的。王老师学识渊博、治学严谨、实事求是，跟随他科研学习的这几年使我受益良多。陈老师为人谦和、和蔼可亲、无微不至，让我学习之余也能感受到家的温暖。两位老师在学习和生活上的教诲都将使我终生受益。本文的完成也得到了孙蓉老师、付斌老师、纪宇老师的热心帮助，在此对他们表示深深的感谢。

同时，也要感谢我的师兄林欣堂、吴攀超、张浩鹏、罗祥，师姐周巍，你们在学习和生活给予了我很多帮助，我从你们身上学习很多宝贵的东西。感谢一直在我身边的朋友们，陈宇、高志远、褚慧慧，你们的关心和支持是我坚强的后盾。

最后，感谢我的父母和我的姐姐，是他们一直站在我的身后默默无私的奉献，是他们的鼓励和关怀使我能够克服每一次遇到的困难，我取得的所有成绩与他们的关心、支持密不可分。