

仪器科学与技术学科研究生系列教学参考书

视觉测量 原理与方法

THE PRINCIPLE OF VISION METROLOGY

郝继贵 于之靖 ◎ 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

仪器科学与技术学科研究生系列教学参考书

视觉测量原理与方法

郝继贵 于之靖 编 著



机械工业出版社

仪器科学与技术学科研究生系列教学 参考书编审委员会

顾问 (以姓氏笔画为序):

丁天怀 清华大学

施文康 上海交通大学

安志勇 长春理工大学

靳世久 天津大学

主任委员: 曾周末 天津大学

副主任委员 (以姓氏笔画为序):

王 祁 哈尔滨工业大学

宋爱国 东南大学

童 玲 电子科技大学

颜国正 上海交通大学

余晓芬 合肥工业大学

张文栋 中北大学

董景新 清华大学

委员 (以姓氏笔画为序):

万江文 北京航空航天大学

王代华 重庆大学

王建林 北京化工大学

田 地 吉林大学

刘缠牢 西安工业大学

许贤泽 武汉大学

李东升 中国计量学院

陈耀武 浙江大学

林建辉 西南交通大学

赵跃进 北京理工大学

徐熙平 长春理工大学

章卫国 西北工业大学

黄元庆 厦门大学

孔 力 华中科技大学

王克逸 中国科学技术大学

王跃科 国防科学技术大学

刘桂雄 华南理工大学

华灯鑫 西安理工大学

张仁杰 上海理工大学

陈一飞 中国农业大学

林玉池 天津大学

赵 建 西安电子科技大学

徐光华 西安交通大学

梅杓春 南京邮电大学

隋青美 山东大学

廖俊必 四川大学

秘书: 王小东 机械工业出版社

前言

精密测量是机械系统和制造技术的基础支撑之一。伴随着现代机械系统结构复杂化、功能多样化和性能极端化的发展,制造技术突飞猛进,制造产品和制造方式发生了重大变化,数字化设计—加工—测量一体化的闭环制造模式已经成为重要的制造手段。相应地,引导和推动着精密测量的原理、方法、技术及其设备不断完善和发展,呈现出一些明显的特点和趋势,如,从接触式非现场测量方式到非接触现场在线测量方式、从单参数非自动化测量方式到多参数自动化集成测量方式、从常规精度测量方式到高精度测量方式等。

为提高测量精度和性能,解决出现的测量新问题,适应制造技术发展要求,实现测量方式的积极转变,新型测量原理、方法和技术一直受到广泛关注和重视。基于光学、电子学的激光及光电测试技术就是一类最为重要的测量方法,它综合利用了几何光学非接触传感、激光优良相干性和方向性,以及电子学和计算机信息处理能力强等的技术特点和优势,具有非接触、精度高、适应性好等显著优势,成为当前研究应用领域内的主流测量手段之一。

视觉测量方法是诸多光电测试方法中的一种,它采用图像传感作为测量信息的获取手段,以图像作为测量信息的源头和载体,除具有光电测量的固有特点外,还具有图像信息量大、容错性好的特点,对于实现多参数、自动化、快速测量具有更加突出的优势。视觉测量是计算机视觉与精密测量相结合的产物,关注的测量对象主要是几何特征,包括尺寸、形状、坐标(位置)、空间关系等,其中坐标量,尤其三维空间内的坐标量是基本元素,因为可以导出其他类型的几何量,而受到重点关注。

视觉测量的研究和应用始于20世纪六七十年代,作为机器视觉的一部分成功地解决了一些工业制造过程中的现场测量问题而受到重视,继而随着硬件性能的显著提升,相关研究成果的不断积累与丰富,尤其是新型测量难题的不断出现,视觉测量研究和应用获得了快速发展。早期的视觉测量在非接触和现场适应性上表现出很好的优势,但是精度并不突出,测量方法(原理)和应用模式也比较单一。几十年来,视觉测量一直在探索测量方法多样化、应用模式创新和提高测量精度等多方面进行研究和探索,取得了积极进展,针对当前制造中的新产品、新工艺、新设备,成功研发了大量的视觉测量技术及其应用设备,测量精度提高迅速,成为控制制造过程、确保产品质量的一项不可或缺的测量手段。

视觉测量是以应用需求为驱动的测量方法,在解决应用问题过程中逐渐形成了自己的内容体系和方法特色。本书作者及其课题组在国内较早地将计算机视觉引入到精密测量领域,系统地研究了基于激光视觉和精密测量原理的激光视觉在线测量原理与方法,成功投入工业应用,解决了一类工业制造过程中的在线尺寸测量与控制难题,为工业界提供了一种高效的在线测量手段,先后为国内主流汽车制造厂研制组建了多个实用的视觉测量系统,获得了显著的应用效果。本书的主要内容建立在长期科研和工程应用实践积累成果的基础上,既是对已经完成工作的梳理和总结,也是研究成果和经验的分享。

全书紧紧围绕着视觉和精密测量紧密结合的主题,组织内容,展开论述,共分9章,第

1章从制造背景需求出发,介绍了视觉测量的概念、特点及主要研究内容;第2章给出了视觉测量研究中采用的主要数学方法和工具;第3~5章论述了面向视觉测量的图像处理方法和技术;第6、7章论述了视觉测量的原理和方法;第8章论述了工业视觉测量系统的原理和实现技术;第9章面向大尺度空间的精密测量问题,论述了基于数字近景摄影测量理论的数字化测量原理、方法和关键技术。

在本书的写作过程中,刘常杰副教授、任永杰讲师、王一博士后提供了大量帮助,任永杰、吴斌、王一提供了部分章节的内容素材,郭磊、林嘉睿投入了大量时间和精力进行材料的组织和整理,郭寅、邹剑等在材料收集整理过程中付出了辛勤的工作,郭磊参与了全部书稿的编辑处理工作。本书是大家集体劳动的成果。

限于作者的学识水平,书中一定存在疏漏、欠妥甚至错误之处,恭请读者指正!

编著者

目 录

前言

第 1 章 绪论..... 1

- 1.1 先进制造与视觉测量 1
- 1.2 视觉测量的发展 2
- 1.3 视觉测量的主要研究内容 4
 - 1.3.1 视觉摄像机 4
 - 1.3.2 成像模型及其参数确定 5
 - 1.3.3 结构标定与系统标定 7
 - 1.3.4 高精度亚像素图像处理 9
 - 1.3.5 光学编码与辅助光学靶标 10
 - 1.3.6 大范围视觉测量系统 11
 - 1.3.7 移动视觉测量 12
 - 1.3.8 视觉测量自动化 13

参考文献 14

第 2 章 视觉测量的数学基础 15

- 2.1 视觉测量坐标系 15
 - 2.1.1 视觉测量常用坐标系 15
 - 2.1.2 常用坐标系之间的关系 16
 - 2.1.3 共线方程 17
- 2.2 空间刚体变换 18
- 2.3 仿射变换与透视变换 20
 - 2.3.1 仿射变换 20
 - 2.3.2 透视变换 22
- 2.4 非线性优化 24
 - 2.4.1 非线性优化的定义 25
 - 2.4.2 一维搜索方法 25
 - 2.4.3 无约束非线性优化方法 26
 - 2.4.4 约束非线性优化方法 28

参考文献 29

第 3 章 图像信息预处理 31

- 3.1 图像滤波 31
 - 3.1.1 图像滤波概述 31
 - 3.1.2 图像滤波的分类 33
 - 3.1.3 典型滤波算法 33
- 3.2 特征增强 35
 - 3.2.1 特征增强概述 35
 - 3.2.2 典型增强方法 37

3.3 区域分割与分析 40

- 3.3.1 区域分割与分析概述 40
- 3.3.2 典型区域分割与分析方法 42
- 3.4 边缘检测 44
 - 3.4.1 边缘检测概述 44
 - 3.4.2 典型边缘检测方法 45

参考文献 48

第 4 章 图像精密处理 49

- 4.1 图像匹配 49
 - 4.1.1 Hough 变换 50
 - 4.1.2 基于灰度的模版匹配 52
- 4.2 多频道匹配算法 53
- 4.3 处理精度分析 55
- 4.4 最小二乘模板匹配 57
 - 4.4.1 最小二乘模板匹配法 57
 - 4.4.2 自适应模板的构造 59
- 4.5 光学控制点 59
 - 4.5.1 定向反光标志 60
 - 4.5.2 点状光源 60
 - 4.5.3 红外 LED 特性 61
 - 4.5.4 高倍率图像细分 63

参考文献 65

第 5 章 图像的硬件处理 66

- 5.1 硬件处理概述 66
- 5.2 典型硬件处理算法 66
 - 5.2.1 二维卷积在 FPGA 中的实现 67
 - 5.2.2 中值滤波在 FPGA 中的实现 69
 - 5.2.3 Hough 变换实现直线粗提取 70
- 5.3 常用的硬件处理平台 75
 - 5.3.1 DSP 及开发平台 75
 - 5.3.2 FPGA 及开发平台 75

参考文献 77

第 6 章 图像传感器模型 78

- 6.1 二维成像模型 78
 - 6.1.1 小孔成像模型 78
 - 6.1.2 实际摄像机内参数模型 79
- 6.2 一维成像模型 84

6.3 成像模型标定	85	8.1.3 误差补偿	115
6.3.1 常规摄像机内参数校准概述	85	8.1.4 系统机械结构	117
6.3.2 立体和虚拟立体靶标 摄像机内参数校准	85	8.1.5 控制系统	118
6.3.3 摄像机内参数校准细化补偿	94	8.1.6 数据管理	119
参考文献	97	8.2 柔性在线测量系统	122
第7章 视觉测量原理	99	8.2.1 柔性在线测量系统的工作原理	122
7.1 结构光测量	99	8.2.2 系统校准	122
7.1.1 结构光视觉原理	99	8.2.3 机器人定位误差补偿	125
7.1.2 点结构光视觉传感器 数学模型	100	8.2.4 在线测量系统的工作过程 与控制网络	129
7.1.3 线结构光视觉传感器 数学模型	101	参考文献	130
7.1.4 多线结构光视觉传感器 数学模型	102	第9章 数字化视觉精密测量	131
7.1.5 结构光视觉传感器标定方法	102	9.1 概述	131
7.2 立体视觉测量	105	9.1.1 测量系统的构成	131
7.2.1 双目立体视觉测量模型	106	9.1.2 测量原理及工作流程	136
7.2.2 双目立体视觉传感器 标定方法	107	9.2 相机成像基站的外部方位	139
7.3 单摄像机测量	108	9.2.1 初始绝对方位	139
7.3.1 单摄像机测量数学模型	108	9.2.2 相机成像基站的相对方位	145
7.3.2 控制点空间坐标 求解的多义性	110	9.3 空间特征点匹配	158
7.4 光束平差测量	111	9.3.1 基于外极线约束的特征点 匹配方法	158
7.4.1 光束平差测量数学模型	111	9.3.2 基于外极平面角的特征点 匹配方法	159
7.4.2 平差初值的获取	112	9.4 三角测量与反推投影	160
参考文献	113	9.4.1 空间特征点三角测量原理	161
第8章 工业在线视觉测量系统	114	9.4.2 空间特征点反推投影	164
8.1 固定式多传感器在线测量系统	114	9.5 空间优化平差及后处理	165
8.1.1 系统的工作原理	114	9.5.1 基于共线方程的光束 优化平差	165
8.1.2 系统全局校准	115	9.5.2 快速优化平差和后处理	167
		参考文献	171

第1章 绪 论

1.1 先进制造与视觉测量

测试计量技术是国民经济的重要技术基础之一，是机械科学和先进制造不可或缺的重要组成部分，是制造的“眼睛”。传统意义上，机械系统及制造过程中的测量技术，在某种程度上只是产品质量的检验手段，现代测量技术及其仪器设备已不再是单纯的辅助检测设备，而逐渐发展成为必需的生产部件或设备，集成于机械系统，参与到制造过程中，应用于工业现场。近年来视觉测量的迅速发展为先进制造中非接触现场测量提供了有效解决方案，并获得了成功的工业应用。

视觉测量技术是一项以计算机视觉为基础的新型测量技术，原理上具有非接触、实时性强、精度高、信息量丰富等显著优点，随着相关硬件、软件性能的飞速进步和成本不断降低，视觉测量的原理优势逐渐得到充分发挥，被认为是实现现场、在线测量的最有效手段之一。视觉测量源于计算机视觉，但并不完全等同于计算机视觉，计算机视觉是通过三维场景映射得到的二维图像来研究和感知场景三维空间几何结构的理论，强调的是识别和理解功能，侧重于理论研究；而视觉测量则是“纯粹”研究三维空间内几何尺寸测量的理论和方法，侧重于工程应用。在计算机视觉研究中，包含场景信息的二维图像除了含有场景三维结构信息外，还涉及其他复杂因素，诸如几何关系、光照条件、景物表面光学反射特性、光学成像系统特性等，所有这些因素都参与成像过程，因此从二维图像（且包含噪声、畸变）中恢复景物的三维结构信息是一个困难的问题，更加重要的是，成像过程是三维空间到二维空间的映射，丢失了一维信息，是不可逆的，理论上不能直接用于恢复三维结构。由图像信息恢复三维场景（Shape from X）问题是计算机视觉的一个基本问题，在 D. Marr 计算视觉理论的指导下，研究人员做了大量卓有成效的工作，理论算法取得了令人瞩目的成果，但与此相反，Shape from X 在解决实际问题时遇到很大困难，主要表现在：运用计算视觉理论解决 Shape from X 问题时，隐含了一个前提——二维图像中的特征识别、分割问题已经解决，但工程问题中这是不成立的，工程应用三维场景总是复杂的，且伴随着不良的光照条件和图像噪声，对图像景物特征的识别处理本身就是巨大的挑战，尚无有效的方法，以此为前提的“纯粹”计算视觉自然无法有效解决实际应用问题。

计算机视觉应用于测量还要解决另一个问题——精度问题，和一般的定性问题不同，测量问题必须满足一定的精度指标。传统的计算机视觉研究，侧重于定性的三维场景识别和理解，很少涉及或不涉及定量的精度分析。视觉测量则是以计算机视觉为理论基础，结合精密测量、测试理论，解决工程应用领域内的测量问题，视觉测量的主要对象是三维空间内的形（状）位（置）尺寸，要求在满足一定的精度前提下，实现被测对象的可靠测量。一般而言，有实用价值的测量方法必须满足两个基本条件：首先，具备高可靠性和可用性，具有良好的环境适应性，对工作环境不能有过多限制和苛刻要求；其次，具备精度保证手段，要有系统

的误差分析设计方法和精度传递（溯源）手段，从理论和量值传递两方面保证测量的科学性。鉴于上述要求，考虑到视觉的特点，结构光测量、主动立体视觉法移动摄影等是视觉测量中最常用、最有效的方法，其共同特点是，通过照明（投射）或光学标记技术，主动构造测量环境，保证了二维图像高质量和显著的测量特性，图像分析处理简洁、快速，精度高，充分保证了测量结果的可靠性和精度，同时具有结构简单合理的特点，便于工程应用。

1.2 视觉测量的发展

视觉测量技术从 20 世纪 60 年代出现，就被认为是解决工业制造过程中测量问题的最具前途的技术，曾有机机构预测，视觉测量技术将占工业测量的 80%，迄今为止，视觉测量技术在成像器件、理论分析方法、关键技术及工程应用等方面都取得了长足的进步，已显示出了巨大的发展空间。

视觉测量在汽车工业中的应用已十分广泛，如图 1-1 所示。国外，美国三大汽车公司相继与美国 Michigan 大学和 Perceptron 公司合作，成功研制了用于对汽车零部件、分总成和总成产品进行尺寸控制的自动视觉检测系统。国内，天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室成功研制了 IVECO 白车身激光视觉检测站、一汽大众 Jetta 轿车白车身 100% 在线视觉检测站及一汽解放新型卡车在线检测站等，实现了整车总成三维尺寸的自动在线测量。视觉测量技术在汽车零部件的尺寸检测上也得到了广泛应用：通用汽车研究实验室开发了用于汽车零件检测的视觉原型系统，该系统对所有零件均使用相同的过程，通过对一个好零件与坏零件的比较结果来判断检测区域的指定缺陷。

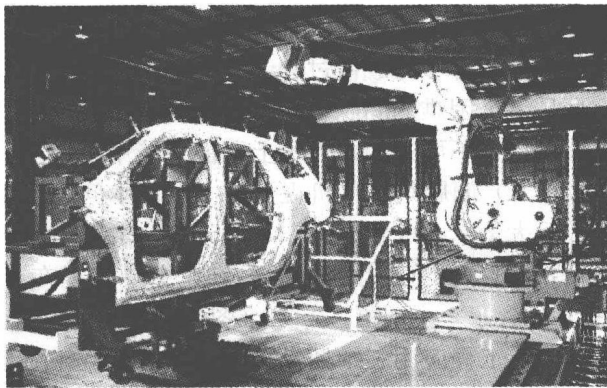


图 1-1 车身视觉测量系统

将视觉测量技术应用在机器人上，研究能够识别目标环境、随时精确跟踪轨迹并调整焊接参数的智能焊接机器人，如图 1-2 所示，已经成为焊接领域的重要发展趋势之一。借助红外摄像仪、CCD 摄像机、高速摄像机等图像传感设备及智能化的图像处理方法，智能焊接机器人可以完成诸如获取并处理强弧光及飞溅干扰下的焊缝图像，进行焊缝空间位置的检测与焊炬姿态的规划，实时提取焊接熔池特征参数，预测焊接组织、结构及性能等工作，实现人工难以直接作业的特殊场合的自动焊接。国外，KUKA、GMF、Motoman、Adept 等厂家相继开发出装备有计算机视觉检测功能的机器人，已经开始应用于潜艇、航天产品的制造过程。

视觉测量在电子行业也发挥重要作用。利用计算机视觉技术开发的视觉检测系统能对电路板组件中的各个连接器特定位置的几何尺寸进行测量,如连接器与PCB底板的相对位置以及连接器内部零件的尺寸、间距等多个参数,检验连接器装配精度是否符合标准和内部零件是否损坏,可以大大提高质量检验工作的效率,降低检验成本。电路板视觉测量如图1-3所示。

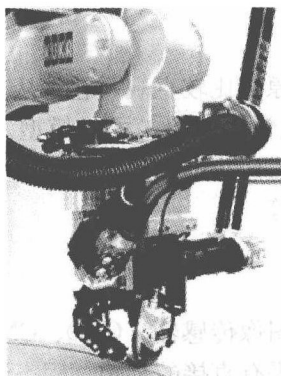


图 1-2 焊接机器人

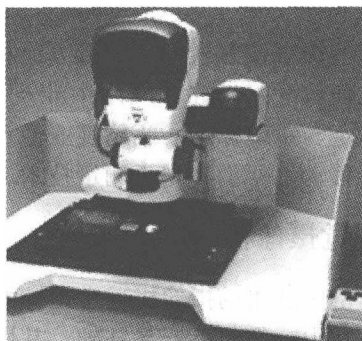


图 1-3 电路板视觉测量

摄像机或相机是视觉测量的基础。从模拟视频摄像机到数字摄像机,从小尺寸图像传感器(CCD CMOS)到全画幅、高填充率图像传感器,从仅有成像功能的普通相机到具有图像处理能力的智能相机,摄像机技术一直在迅速发展,制造成本不断降低,为高性能视觉测量系统的开发和普及应用奠定了坚实的基础。

早期视觉测量分析方法主要来源于计算视觉方法,运用矩阵变换建立分析模型。由于计算机视觉的重点是解决识别和理解问题,没有着重关注测量数据的误差特性,模型简单,精度低,主要应用在精度要求不高的背景场合。随着应用需求扩大、测量精度要求提高、摄像机性能改善,视觉测量的分析方法也发生了显著变化。首先,在成像模型中考虑了更多的误差因素,以校正各种物理畸变,采用多参数的非线性模型代替简单的线性模型,并从数学角度研究了很多误差补偿措施,大大提高了模型精度;其次,将精密测量领域内的标定方法、技术和设备引入到计算机视觉中,为补偿和修正各种误差提供了更加专业的解决方法,能有效控制并提高测量精度;再次,近景摄影测量理论和计算视觉的结合大大推动了视觉测量技术的发展。近景摄影测量的平差理论、共线理论、像差校正技术、控制场技术、定向技术等完善的理论方法为视觉测量研究和应用的不断拓展提供了良好的理论支持,这种理论上的支持对于高精度的大空间视觉测量尤为重要。此外,图像处理、模式识别理论及技术的发展也大大改善着视觉测量系统的性能。V-STAR(S)系统就是典型的工业数字近景摄像测量应用系统,由美国GSI公司研制。该系统具有三维测量精度高、测量速度快、自动化程度高和能在恶劣环境中工作等优点,是目前国际上最成熟的商业化工业数字摄影测量产品。

视觉测量的应用范围也在不断扩大,早期的视觉测量受到图像传感器和图像处理软硬件技术的限制,成本高、性能指标较低,主要用于特定的、有非接触要求的场合,现今视觉测量的硬件成本显著降低,具备了大规模推广应用的条件,同时性能得到了极大提升,可以满足



足绝大多数工业测量需求,以三维空间尺寸测量为例,视觉测量已能稳定实现优于 0.02mm/m 的测量精度,基本满足了工业制造对测量精度的要求。此外,在现代制造技术的快速发展过程中,出现了很多新型测量问题,传统测量手段无法解决,客观上也推动着视觉测量研究的发展和应用范围的不断扩大。

1.3 视觉测量的主要研究内容

与传统的机械接触式精密测量方法相比,视觉测量的原理比较直观,它是从二维图像中恢复空间几何尺寸,研究和应用中涉及的关键问题有:视觉摄像机、成像模型及其参数确定、结构标定与系统标定、高精度亚像素图像处理、光学编码与辅助光学靶标、大范围视觉测量系统、移动(便携)视觉测量技术、视觉测量自动化等。

1.3.1 视觉摄像机

视觉测量中选用的摄像机通常是性能稳定的基于固态图像传感器(CCD、CMOS)的固态摄像机,其中图像传感器是基础,其性能参数对测量结果有直接的影响。固态图像传感器的性能分为两类:光电性能和几何特征。光电性能决定了图像性能质量,包括光谱范围、信号动态范围、噪声水平、响应速度等,它们对应用环境、测量方式(静态、动态)、测量精度(细分精度)都有极其重要的影响;为满足精度要求,对图像传感器的几何特征参数也有一定要求,主要表现在图像传感器感光像元尺寸一致性和感光芯片表面的平面度两方面。目前的微电子制造工艺可以保证感光像元尺寸的一致性 RMS(方均根误差)达到了 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$,仅为单个像元尺寸的 $1/60\sim 1/100$,在实际测量中可以不考虑尺寸一致性的影响,但感光芯片表面的平面度问题就复杂一些,有研究测试表明:普通图像传感芯片表面的平面度甚至达到了 $10\mu\text{m}$,大于一个像素尺寸,已经对测量精度构成威胁,遗憾的是目前还没有统一的方法对其进行数学建模,消除该项误差。

按性能的不同,视觉测量中常用的摄像机有模拟视频摄像机(Standard Video Format Camera)、高分辨率数字摄像机(High Resolution Camera)和静态视频摄像机(Still Video Camera,俗称数码相机)几类。模拟视频摄像机是一种采用模拟视频信号传输的低成本解决方案,图像传感器大多为 $1/2\text{in}$ ($1\text{in}=0.0254\text{m}$) 和 $1/3\text{in}$,有效感光面积在 $6.4\text{mm}\times 4.8\text{mm}$ 到 $4.9\text{mm}\times 3.7\text{mm}$ 之间,水平分辨率大约在 700 像素左右,垂直分辨率大约在 500 像素左右。由于采用模拟传输方式,图像信号存在由数字信号合成模拟信号,再由模拟信号重新采样为数字图像的变换过程,引入了采样误差和相位畸变,造成最终数字图像质量下降,影响测量精度,因此,模拟视频摄像机一般应用于视场较小,相对测量精度不高的场合。但模拟视频摄像机的优点是单机成本低、传输速度快(每秒 50 帧以上)、多个摄像机可以采用总线连接方式传输,特别适合于对成本有一定控制的工业视觉检测问题。

与模拟视频摄像机不同,高分辨率数字摄像机采用数字传输方式输出图像信号,具有很高的像素和空间分辨率,动态范围宽,线性好且具备很低的噪声水平。数字摄像机优良的图像质量为高精度测量提供了前提,在保证模型精度的前提下,可以充分发挥图像传感器的性能,实现高精度测量。高分辨率数字摄像机也存在一些负面因素:传输数据量大、帧频低、成本高,影响其在特定场合的使用。

1.3.2 成像模型及其参数确定

成像过程是一个三维物体空间到二维图像空间的映射过程,所谓成像模型是指建立这种映射关系的精确定量数学描述。在视觉测量系统中,摄像机是作为一个基本的传感元件使用的,摄像机模型的复杂性及精度直接决定着测量结果精度。一般来说,描述摄像机模型有两类方法:一类是基于摄像机成像过程和自身物理参数的成像模型;另一类是抽象的,基于投影变换关系的模型。在视觉测量技术的研究中,前者有明确的物理基础,便于误差校正和补偿,是主要的模型形式。按模型的复杂性与适用范围,成像模型大致可分为针孔成像模型(Pinhole)、直接线性变换模型(DLT)和摄影测量模型等。

针孔成像模型是用理想的小孔成像来简化实际的摄像机成像,模型的数学描述简单,能在一定的精度上很好地描述实际使用的大部分摄像机的成像过程,如图1-4所示, P 为物点, Q 为像点,摄像机针孔模型用数学形式表示:

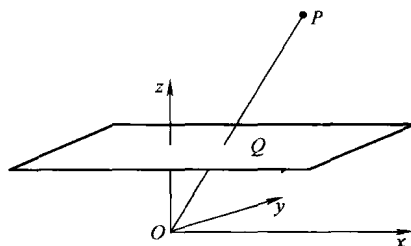


图 1-4 摄像机针孔模型

$$q = FMT P \quad (1-1)$$

式中, $q = (x, y)$ 为像点 Q 在摄像机像平面上的坐标; $P = (X_w, Y_w, Z_w)$ 为物点 P 在摄像机坐标系中的三维坐标; F 矩阵和摄像机有效焦距有关,该矩阵描述了三维空间到二维平面的透视变换; M 矩阵与摄像机坐标系和物体坐标系之间的空间相对关系有关,它是两个坐标系之间旋转关系的描述; T 矩阵则是摄像机坐标系与物体坐标系之间空间平移关系的描述。针孔模型是线性理想模型,模型中各参数的物理意义明确,模型的解算也较简单,适合于精度要求不高、摄像机成像质量高的应用场合,是其他模型的基础。

在针孔模型中,为简化问题,进行了许多假设,使模型理想化。直接线性变换模型(DLT)是对针孔模型的发展,在针孔模型基础上,补充考虑了部分成像因素,使模型接近物理原型,DLT模型由下式表述:

$$q = AP \quad (1-2)$$

式中, P, q 与式(1-1)中的含义相同; A 为矩阵,可分解为

$$A = \lambda V^{-1} B^{-1} FMT \quad (1-3)$$

式中, $\lambda \neq 0$,表示刻度因子; F, M, T 三个矩阵,它们与针孔模型中具有相同的含义; V, B 两个矩阵是考虑了摄像机成像时,像素坐标系和摄像机坐标系之间的相对位置偏移及像素坐标系的非正交性引入的补偿矩阵。DLT模型比较准确地反映了成像过程,是一个较通用的模型。和针孔模型相比,DLT考虑的因素多,精度得到改善,在对精度要求不太高的场合,DLT模型比较实用。但在精度要求高,摄像机镜头存在明显的畸变时,DLT模型可能会引入较大的误差。为此,研究了一种扩展的DLT模型,它以DLT模型为基础,充分考虑了摄像机镜头成像时存在的畸变因素,引入了修正因子,补偿畸变误差。扩展DLT模型更准确地反映了摄像机成像过程,较全面地考虑了成像过程中的误差因素,是一个更一般的模型。

对于高精度的视觉测量,成像器件一般选用高质量的数字成像器件(大尺寸、高填充率、高像素),为充分发挥器件的性能,实现理想的测量精度,需要研究更加精细的成像模型来精确描述成像的物理过程,一般考虑采用摄影测量模型。摄影测量模型也是以理想的针



孔模型为基础,通过增加一项复杂的综合修正因子,来修正实际成像中的像点位置和模型中像点位置之间存在的微小偏差,从而对模型做出精确的补偿。

在摄影测量模型中,假设 (x_u, y_u) 为空间物点 P 在像平面上理想像点坐标(理想透视,不存在任何畸变),实际成像过程中,考虑到各种畸变因素,实际像点位置为 (x_p, y_p) ,则

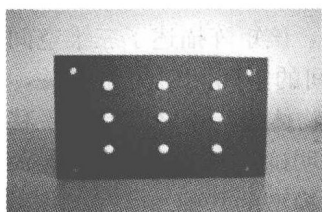
$$\begin{cases} x_u = x_p - x_0 - \Delta x \\ y_u = y_p - y_0 - \Delta y \end{cases} \quad (1-4)$$

式中, (x_0, y_0) 为像面中心, $\Delta x, \Delta y$ 为成像综合畸变(修正因子),可采用下列模型:

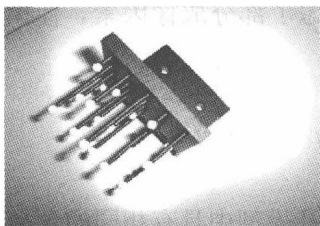
$$\begin{cases} \Delta x = x_c r^2 k_1 + x_c r^4 k_2 + x_c r^6 k_3 + (2x_c^2 + r^2) p_1 + 2p_2 x_c y_c + b_1 x_c + b_2 y_c \\ \Delta y = y_c r^2 k_1 + y_c r^4 k_2 + y_c r^6 k_3 + 2p_1 x_c y_c + (2y_c^2 + r^2) p_2 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中, $\begin{cases} x_c = x_p - x_0 \\ y_c = y_p - y_0 \end{cases}; r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$ 。

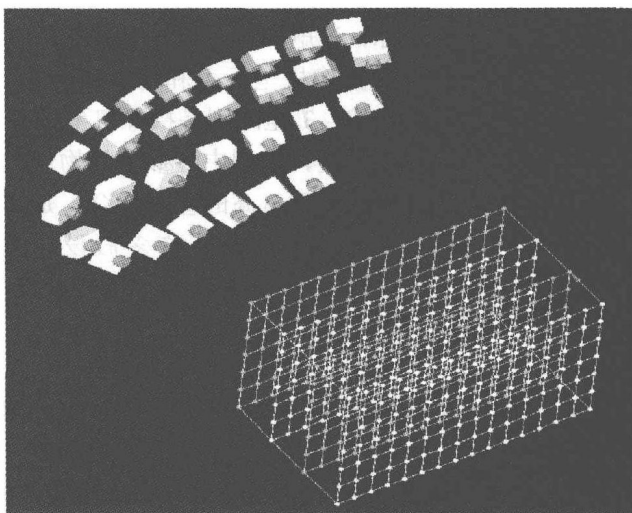
成像模型中参数的确定是通过标定过程实现的,通常分为直接标定法和自标定法。直接标定法是通过建立已知空间点(控制点)三维坐标及其对应成像点的二维像面坐标之间的对应关系确定模型参数:对于较小视场的成像,可以通过精确的共面或非共面的靶标建立控制点的三维物点和二维特征像点的对应,如图 1-5a、b 所示;对于较大视场的成像,可以通过大型 CMM 构造较大空间的三维控制点,如图 1-5c 所示。



a) 共面控制点



b) 非共面控制点



c) CMM 虚拟控制点

图 1-5 标定控制点

直接标定方法直观,是主要的标定方法,但对于更大的视场空间,设置高精度的三维(二维)控制点非常困难,标定过程烦琐,且标定结果受控制点空间坐标精度的影响,容易产生误差。较彻底的解决途径是消除标定过程中需要控制点的三维坐标已知这一约束条件,将控制点的空间坐标值作为未知变量代入模型中,在标定过程中,同时解算模型参数和控制点的空间坐标,即采用自标定技术。自标定技术是基于空间光束定向交会原理的摄像机标定技术,其基本思路是:在空间简单设置标定控制点,控制点的空间坐标未知,摄像机在不同的姿态 $(\alpha^n, \beta^n, \theta^n, t_x^n, t_y^n, t_z^n)$ 条件下,获取视场中控制点的图像,处理得到控制点的像

面坐标,如图1-6所示。

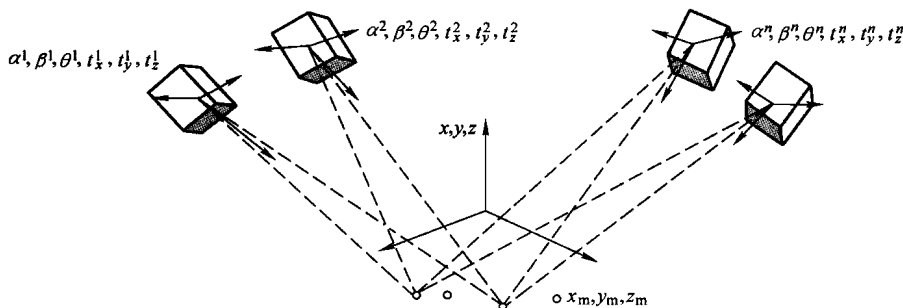


图 1-6 光束定向交汇自标定原理

根据光束定向交会原理,同一控制点在摄像机不同姿态下对应的成像光束在空间应当交会于一点,由此得到包含摄像机模型参数和控制点坐标的非线性约束方程组,从中可以解算出模型参数、控制点坐标以及摄像机姿态。自标定的本质是将摄像机的姿态、控制点的空间坐标以及模型参数均作为未知量,以控制点的成像光束在空间交会作为已知条件,建立非线性的大规模方程组,从中解算摄像机模型参数,从原理上消除了直接标定方法中要求控制点三维坐标已知的局限性。自标定法对工作环境要求不高,易于实现,甚至可以实时应用于测量现场环境,标定结果不受控制点坐标精度影响,标定精度高,且标定过程可以和测量过程有机结合,提高系统测量精度,是一种适合大尺寸视觉测量的成像模型参数标定技术。

1.3.3 结构标定与系统标定

在精密测量领域,标定环节是实现和保证精度的关键。对于视觉测量而言,被测对象(空间三维尺寸)是通过分析二维图像特征坐标得到的,除光学成像外,还涉及图像传输、图像处理、结构设计、系统组建等多个环节,精度控制和标定问题更加突出。除了确定摄像机参数的标定过程外,视觉测量中的标定问题还包括视觉传感器(结构光、立体视觉)结构参数标定以及系统标定。结构参数标定是指通过标定而非精密调整的方式,确定视觉传感器的结构参数;系统标定是指对于大型视觉测量系统,确定多个视觉传感器之间精确姿态的方法,以确保所有测量传感器在同一个系统坐标系中工作,并建立和被测工件坐标系之间的关系。

结构光传感器的标定是指确定光平面在摄像机坐标系中的精确位姿,典型的结构光传感器的标定原理如图1-7所示。

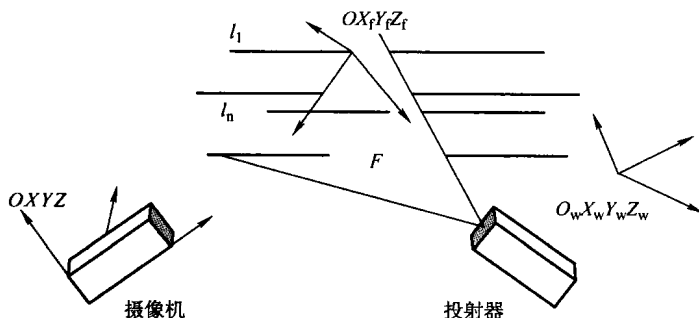


图 1-7 结构光传感器的标定原理

标定借助一个细丝靶标进行, 细丝靶标上固定 n 个 (相互近似平行) 细钢丝 $l_1, \dots, l_n$ 。将细丝靶标固定在传感器的工作空间内, 取细丝方向和光平面的法向一致。光平面入射到靶标细丝上时产生 n 个散射亮点 P_i ($i=1, \dots, n$), P_i 对应像点的像素坐标由图像经处理得到, 相应地, P_i 的空间三维坐标可用另外的空间坐标测量设备测量。通过 P_i 的空间坐标和对应像点的像素坐标之间的关系, 可以解算得到光平面的位姿。但上述方法的精度很大程度上受到 P_i 空间位置精度和对应像点质量的影响, 为提高标定精度, 已经有很多研究工作试图消除这种影响, 并取得了很好的效果。

立体视觉传感器的标定是确定两个摄像机之间的空间姿态关系, 从而建立精确的空间三角交汇 (立体视差) 测量模型。设两个摄像机坐标系分别为 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、 $O_2X_2Y_2Z_2$, 标定的目的是建立两个坐标系之间的变换矩阵: 旋转矩阵和平移矩阵, 标定原理如图 1-8 所示。

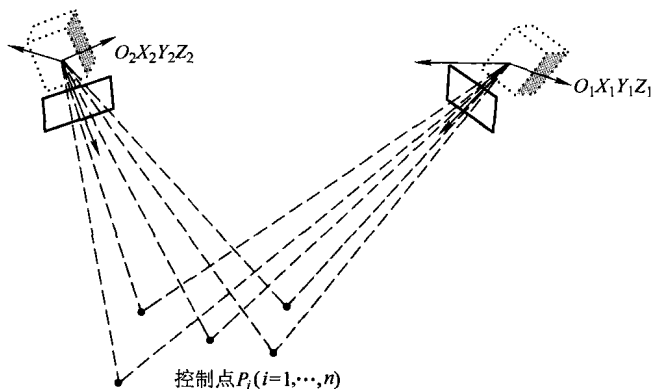


图 1-8 双摄像机空间位姿关系的标定原理

采用与摄像机自标定类似的光束定向交会约束可以很好地解决双摄像机之间位姿关系的标定问题。在双摄像机的重合视场中任意设置控制点 (点的空间坐标无需已知) P_i , 控制点在两个摄像机中的成像光束必定在空间交会, 以此为约束可以精确求解摄像机之间的空间变换关系。对于较小视场 (测量空间) 的传感器, 也可以采用固定靶标产生控制点。

系统标定是将系统中多个测量传感器坐标系统一到一個测量坐标系下, 在大型视觉测量系统中, 一般包含数十甚至上百个传感器, 且分布空间范围大, 姿态任意, 系统标定复杂, 精度保证困难。一般地, 系统标定可以借助一个外部三维坐标测量装置和精密靶标实现, 全局标定原理如图 1-9 所示。

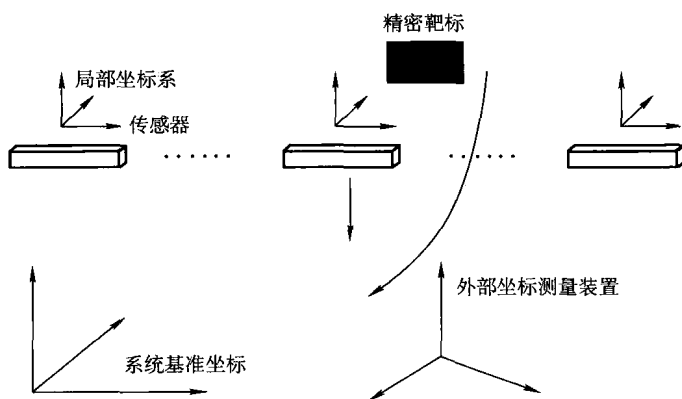


图 1-9 全局标定原理

令传感器 (测头) 坐标系为 $O_sX_sY_sZ_s$, 外部测量坐标系为 $O_oX_oY_oZ_o$, 靶标坐标系为 $O_TX_TY_TZ_T$, 系统测量坐标系为 $O_bX_bY_bZ_b$, 标定时, 首先, 测头和外部测量装置同时测量靶标, 分别建立测头坐标系 $O_sX_sY_sZ_s$ 和靶标坐标系 $O_TX_TY_TZ_T$ 、靶标坐标系 $O_TX_TY_TZ_T$ 和外部

测量坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 之间的关系, 此外, 用外部测量装置测量系统坐标系 (基准点位置), 建立外部测量坐标系 $O_s X_s Y_s Z_s$ 和系统坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 之间的关系, 经过坐标变换链:

$$O_s X_s Y_s Z_s \rightarrow O_T X_T Y_T Z_T \rightarrow O_b X_b Y_b Z_b$$

可以得到每一个测头坐标系到系统测量坐标系的变换关系, 即系统标定。外部测量装置可以选用基于电子经纬仪的工业坐标测量系统或者激光跟踪坐标测量系统。

1.3.4 高精度亚像素图像处理

图像处理是视觉测量的基础算法, 也是决定测量精度的关键环节。受到成本的制约, 目前工业领域内使用的成像器件一般在千万像素, 单方向 (X、Y) 上像素在 3000 左右, 对于 $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$ 量级的高精度测量, 必须采用精密的亚像素图像处理技术。

高精度亚像素图像处理算法建立在高质量图像和精确预定义模式特征的基础上。在高精度应用场合, 待处理的图像特征点是应当预先定义的, 其模式和图像质量可以控制, 利用亚像素算法, 可以将特征点的处理精度提高到亚像素甚至更高的水平。在图像质量严格保证的前提下, 已经能够稳定实现约 0.01 像素的细分精度。质心法、基于灰度相关匹配法和基于边缘的拟合法是三种有效的亚像素图像处理算法。

质心法采用图像特征有效区域的质心作为特征点的精确位置, 最基本的算法定义为

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^N X_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i}, Y_m = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i I_i}{\sum_{i=1}^N I_i} \quad (1-6)$$

式中, X_i 、 Y_i 为像素坐标; I_i 为像素灰度; N 为有效特征区域内的像素数。质心法直观、计算简单, 对于图像特征区域明显的特征点有很好的处理精度。但质心法对图像特征区域的划分较敏感, 特征区域通常由阈值决定, 对于一般图像, 选取精确的阈值相当困难, 处理精度受到影响。

基于灰度相关匹配的特征点提取算法建立在图像相关运算的基础上, 以已知的图像特征模板和待处理的图像作相关运算, 得到相关曲面, 再采用插值方法精确提取相关曲面的峰值作为特征点的位置, 归一化的相关运算定义为

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I_i M_i - \left[\sum_{i=1}^N I_i \right] \left[\sum_{i=1}^N M_i \right]}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N I_i^2 - \left[\sum_{i=1}^N I_i \right]^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N M_i^2 - \left[\sum_{i=1}^N M_i \right]^2 \right}}} \quad (1-7)$$

式中, I_i 为待处理图像像素灰度; M_i 为模板图像像素灰度; N 为像素数。 r 越大, 表明匹配越精确, 反之, 匹配越差。相关运算的运算量很大, 为减小运算量, 提高处理速度, 通常采用“金字塔”算法, 由粗到精, 图像分辨率逐渐细化, 有效地减小运算量, 显著提高测量速度。基于灰度相关匹配的方法有优良的抗干扰性能和处理精度。其前提是待处理图像特征点的模式应当是先验已知的, 并且图像变形对处理精度有一定影响。

基于边缘的拟合法是一种解析处理方法, 建立在图像边缘提取和跟踪的基础上。采用边缘提取算法提取特征点的图像边缘并跟踪边缘曲线, 以此为基础, 运用曲线拟合技术, 得到特征点的位置坐标。边缘拟合法对图像质量和场景有严格要求, 首先, 为保证边缘提取可

靠、精确,要求图像有足够的对比度和很好的信噪比;其次,为保证边缘跟踪准确,算法稳健,场景模式应当尽可能简单。基于上述原因,和质心法、相关匹配法相比较,基于边缘拟合法算法的抗干扰性较差,只能应用在图像质量理想且编码模式简单的场合。

1.3.5 光学编码与辅助光学靶标

理论上,视觉测量只能实现对光学目标点的测量,测量对象应当具有明显、可识别的图像特征。通常的被测物体没有明显的图像特征,为保证图像处理精度和测量自动化的可靠实现,需要在被测物体上放置光学标记(点),并且需要对目标点进行光学编码,便于自动处理和识别,图 1-10 给出了几种典型的光学编码方案。

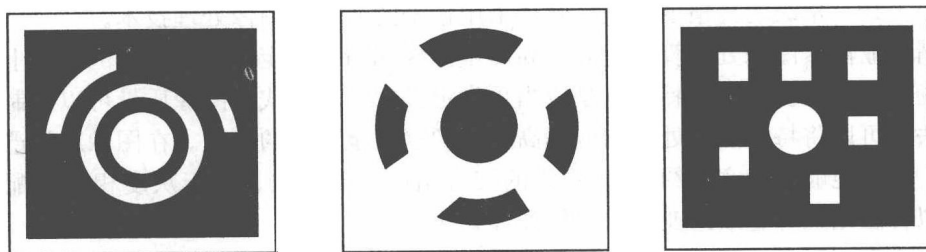


图 1-10 光学编码方案

设计编码方案时,应考虑以下几个方面:

- 1) 编码容量:不同的测量系统需要测量点的数量是不同的,如果需要同时测量多个点,则必须保证编码有足够的容量,使每个编码对应一个测量点。
- 2) 编码距离:为确保编码的自动识别率,应设计合理的编码距离。
- 3) 对比度:应当使光学编码有足够的对比度,保证图像质量。
- 4) 定位标记:编码中,应设计合理的精密定位标记,该标记作为编码特征点的基准位置,如圆心、十字线等。

对于更一般的被测点,如复杂工件(物体)表面上的点,由于视场条件的限制,不能直接通过光学编码标记的方法进行测量,可以借助精密光学靶标来解决,光学靶标是一种辅助测量工具,由精密测球和若干光学编码标记点组成,典型结构如图 1-11 所示。

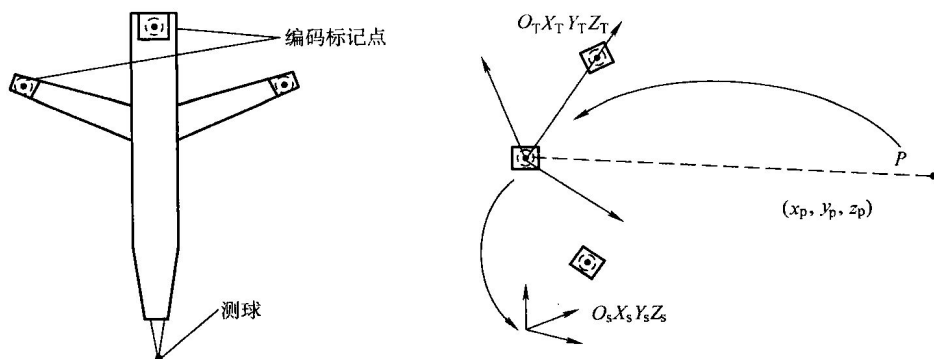


图 1-11 光学靶标的典型结构

设靶标坐标系为 $O_T X_T Y_T Z_T$, 由编码标记点(3个以上)确定,测球在靶标空间内的坐标通过适当的标定方法预先得到。测量时,测球接触被测点,通过测量光学靶标上的光学编