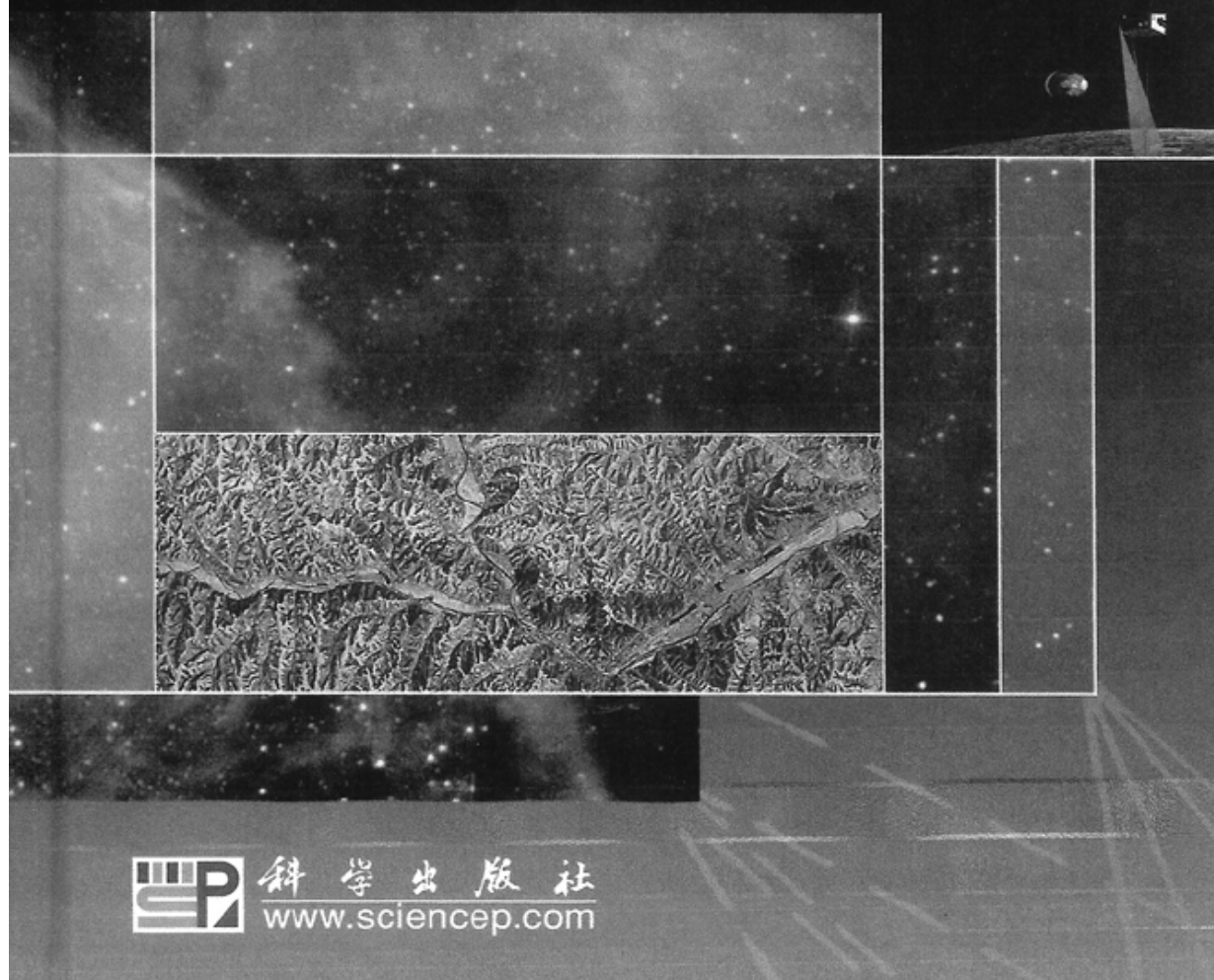


摄像测量学原理与应用研究

Videometrics: Principles and Researches

于起峰 尚 洋 著



于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2009.3. (中国科学院科学出版基金资助出版)

《摄像测量学原理与应用研究》

目 录

前言

第一章 数字图像与摄像测量硬件基础

- 1.1 数字图像的基本特性
- 1.2 数字图像硬件系统简介
- 1.3 摄像系统硬件常用参数术语
- 1.4 摄像测量系统分辨率
- 1.5 影响测量精度的几个主要因素

第二章 摄像测量学基本原理和算法

- 2.1 摄像测量常用成像模型
- 2.2 二维平面摄像测量
- 2.3 空间点目标三维位置交会测量
- 2.4 光束法平差
- 2.5 空间直线和解析曲线测量法

第三章 摄像测量系统标定

- 3.1 像机标定方法概述
- 3.2 基于控制点进行像机标定
- 3.3 基于控制直线的像机标定方法
- 3.4 基于光束法平差优化和约束条件的像机标定
- 3.5 二维图像畸变的标定与修正
- 3.6 像机安装参数标定方法

第四章 图像目标亚像素定位技术

- 4.1 亚像素定位原理和算法设计原则
- 4.2 矩方法
- 4.3 拟合法
- 4.4 数字相关亚像素定位法
- 4.5 定位算法性能评价仿真图的制作
- 4.6 亚像素定位技术在面内转角测量中的应用实例

第五章 图像序列运动目标检测与跟踪

- 5.1 运动目标检测的数字减影法
- 5.2 特征标志的自动识别跟踪
- 5.3 基于模板匹配的目标识别跟踪技术
- 5.4 Mean Shift 跟踪算法
- 5.5 基于光流的运动检测
- 5.6 目标运动轨迹预测与多目标跟踪
- 5.7 数据平滑与速度、加速度计算

第六章 体目标三维位置姿态参数测量

- 6.1 PNP 问题
- 6.2 定制结构目标位置姿态测量
- 6.3 基于轮廓匹配测量目标位置姿态
- 6.4 目标位置姿态参数的双目交会测量

第七章 目标表面三维结构和形状测量

- 7.1 基于多视图几何约束的图像特征点匹配
- 7.2 从未标定图像序列重建目标表面三维结构基本原理
- 7.3 从像机内参数已知的两视图测量目标表面三维结构
- 7.4 摄像测量问题求解的全局优化方法
- 7.5 结构光三维测量法

第八章 飞行器视觉导航方法与技术

- 8.1 基于序列图像和测高数据的飞行器自测速方法
- 8.2 基于序列图像与基准图匹配的飞行器定位测速测向方法
- 8.3 机载飞行器视觉着陆引导方法与技术
- 8.4 地基飞行器视觉着陆引导方法与技术
- 8.5 基于机载序列图像三维地形重建的地形匹配定位导航方法
- 8.6 航天器自主交会对接视觉引导方法与技术

第九章 折线光路像机链摄像测量原理与应用

- 9.1 折线光路像机链摄像测量的背景和意义
- 9.2 折线光路像机链摄像测量原理
- 9.3 折线光路摄像测量的实现与精度分析

9.4 折线光路像机链摄像测量的应用与验证试验

第十章 测量点目标运动参数的单目运动轨迹交会法

10.1 单目运动轨迹交会法的基本原理

10.2 轨迹参数空间搜索法

10.3 平移交会法

10.4 单目三维运动轨迹交会法

10.5 验证实验

第十一章 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法

11.1 系列旋滤波、等值线窗口滤波理论与方法

11.2 ESPI 和 InSAR 数据处理中的系列等值线相关干涉法

11.3 本章内容小结

第十二章 摄像测量学应用实例

12.1 数字式光测图像自动分析判读系统

12.2 火箭待发段箭体倾倒角度实时测量图像分系统

12.3 “神舟六号”航天员舱内三维运动单目摄像测量

12.4 “华南虎”照片的摄像测量研究

12.5 多目标运动参数的高速摄像测量

12.6 机翼动态变形摄像测量

前言

(1) 摄像测量学的内涵和发展历史

1) 摄像测量学的内涵

摄像测量学 (Videometrics 或 Videogrammetry) 是近十几年来国际上迅速发展起来的新兴交叉学科。它主要是由传统的摄影测量学 (Photogrammetry)、光学测量 (Optical Measurement) 与现代时尚的计算机视觉 (Computer Vision) 和数字图像处理分析 (Digital Image Processing and Analysis) 等学科交叉、融合, 取各学科的优势和长处而形成的^[1~6]。它的处理对象以数字 (视频) 序列图像为主。

摄像测量学是研究利用摄像机、照相机等对动态、静态景物或物体进行拍摄得到序列或单帧数字图像, 再应用数字图像处理分析等技术结合各种目标三维信息的求解和分析算法, 对目标结构参数或运动参数进行测量和估计的理论和技术的。国内外许多人也把摄像测量的技术方法称为光学测量或简称光测。

摄像测量学的内涵主要包括两个方面: 一是物体的空间三维特性与成像系统间的成像投影关系, 即二维图像与对应三维空间物体之间的关系, 这主要是测量学方面的知识; 二是从单幅和多幅图像中高精度自动提取、匹配图像目标, 这主要是计算机视觉、图像分析方面的知识。随着摄影测量的三角测量理论和计算机视觉的多视几何理论的日趋发展成熟, 目前摄像测量的研究越来越多地涉及到第二个方面, 即图像目标的自动、高精度识别定位与匹配上。它与常规图像处理的不同在于更侧重于目标的提取定位精度。

将三维空间中的景物成像到二维图像上是一个退化过程, 摄像测量学研究如何通过分析二维图像来重建目标的三维信息。为了进行二维、三维定量测量, 摄像测量必须将图像与成像系统及其参数紧密联系起来, 而普通的图像处理一般与成像系统参数无关。因此, 摄像系统的高精度标定是摄像测量的重要特点。传统摄影测量涉及到的大多是专业的摄影测量型相机, 通常具有专门的标定设备和方法。而摄像测量大多采用的是普通的摄像机、照相机, 经过多种不同的标定方法, 可以使非测量型摄像机、照相机达到测量的要求, 用于高精度测量。

2) 摄像测量学的发展历史

摄影测量学、光学测量和计算机视觉是摄像测量学的重要根基。

自从 1839 摄影术诞生起, 就开始了用照片进行各种测量的应用与研究。围绕着提高

精度这一测量中的永恒主题，摄影测量学经过模拟摄影测量、解析摄影测量阶段，现在已进入数字摄影测量阶段，有非常完备的高精度测量的理论和方法体系。由于传统摄影测量要求的硬件设备繁杂、昂贵，测量算法复杂、计算量大，摄影测量学的研究和应用主要集中在国家、军事和大结构层面上，特别是航空摄影测量和卫星照片测量，并且这种航测和卫测已形成了庞大的测绘产业；而在普通民用领域的中近景摄影测量开展的却少得多。

光学测量既有广义的含义，也有较狭义的含义。利用各种波段的光，包括可见光、红外光、紫外光进行各种测量的方法技术都可以称为光测，它主要是与雷测、遥测、卫测等其它不同质类型的测量相区别。摄影测量、摄像测量、计算机视觉测量等都可以归入光测大类。而在狭义上，光学工程专业中常将各种利用光学专用设备、技术进行的测量，例如经纬仪、各种透镜、棱镜、平行光管、各种干涉技术、激光技术等进行的测量称为光测。光测强调精度。在光学工程、光测实验力学等学科中，将通过光学图像进行的测量称为光测图像技术。

计算机视觉（或称机器视觉）作为一门学科成形于 20 世纪 80 年代，至今仍可以说是一门新兴学科。计算机视觉以及与之紧密相关的数字图像处理、图像分析、图像理解等现代学科是信息时代信息科学的重要代表。计算机视觉自形成以来从其基本理论、算法到相关的硬件，特别是应用上都得到了迅猛的发展，有了许多成熟、成功的应用。计算机视觉领域大多数是以目标识别、图像理解以及显示、监控等应用为主，有丰富的图像处理、分析算法，具有简单、灵活、快速、适应性强等特点，但通常对于测量精度的要求不高。

在学科发展的历史中，摄影测量学主要在地学测绘领域中发展，是地理学科的重要分支；光学测量则是在光学工程、实验力学等学科中发展；而计算机视觉、机器人视觉、图像处理分析等主要是在计算机科学、人工智能领域中发展。三者的形成和发展相对独立，早期交流较少，在所采用的理论方法、面向的应用对象和研究人员归属等许多方面都有较大的区别，形成了各自的特点、优势和理论体系。

国际摄影测量与遥感协会给摄影测量与遥感的定义为：“利用非接触成像传感器和其它传感器系统，通过记录、量测、分析和表达等处理来获取地球及其环境，以及其它物体的可靠信息的科学、技术和工艺”^[7]。光测的内涵是利用各种光学手段实现测量目的，其中占很大比重的是利用光学图像进行测量。而计算机视觉的内涵是：“试图用像机获取环境图像并转换成数字信号，用计算机实现对视觉信息处理的全过程”，“从信息处理的

层次研究视觉信息的认知过程，研究视觉信息处理的理论、表达与计算方法”^[8]。

对于上述多学科交叉融合形成的摄像测量学，测绘界称其为 Videogrammetry，而光学工程和计算机视觉界称其 Videometrics。根据含义侧重不同，国内还有学者称其为视频测量学或视觉测量^[9]。事实上，这些学科大方向都是通过图像来定量观察和认识客观世界，其研究任务在本质上是是一致的。

随着学科的发展以及各种观察和测量任务的不断涌现，摄影测量、光学测量和计算机视觉等领域的研究人员越来越深刻地了解和体会到相互借鉴、融合的必要性和重要性，三个领域研究人员的交流越来越密切。特别是近十几年来，无论是摄影测量领域的会议还是光学工程、计算机视觉中的有关测量、三维重建等的分会议上，通常都有另两个领域的人员参加，并都占有很大的比例。近年来多数相关的国际会议都有意安排会议的主席、副主席分别由不同领域的人员交叉担任，以促进这种交流和融合。

作为这种交流的自然结果，国际光电工程协会（SPIE）于 1993 年在美国硅谷召开的 Photonics West 年会上第一次设立了 Videometrics 分会场，并在其后每一年或每两年召开一次 Videometrics 分会议。

正是由于摄影测量、光学测量与计算机视觉测量在本质上并无严格的区别和界限，因而三者能够很好地融合。只是传统的摄影测量学更强调精度，偏重于航测、卫测等传统的遥感和测绘领域；光学测量偏重于中近景测量；而计算机视觉更偏重于数字图像处理、图像分析、图像理解、多视图几何等方面。Videometrics 在体现三者理论、方法、算法以及应用方面的互通和互补的基础上，更加强调动态测量和实时测量。我们推荐采用“摄像测量学”作为 Videometrics 这一交叉学科的中文命名。

(2) 摄像测量学的应用领域

摄像测量涵盖了摄影测量、光学测量和计算机视觉等三个学科领域，因此它的应用范围也应覆盖着三个学科的应用领域。由于具有诸多的优点，摄像测量技术已经广泛应用于各种精密测量和运动测量，涉及到航空航天、国防试验、勘察勘测、交通运输、建筑施工、体育运动等各个领域^[10,11]，例如零部件加工质量检测、三维表面重建、工业反求工程、建筑工程测量、铁路公路质量检测、飞行器弹道姿态等运动参数测量等等。

摄像测量的一个重要特征是已进入了动态实时测量时代。实时摄像测量的实现为摄像测量学开辟了广阔的、新的研究和应用领域，例如实时监测、视觉导航、工业质量实时检测和监控等。

目前国际上在许多应用领域中已有很多摄像测量方面的商品化产品。摄影测量学的

发源地德国在这方面仍处于领先的地位。例如在对轿车三维外形进行高精度检测时，他们的做法是在轿车的表面贴上大量的合作标志，然后用普通数码相机随意从四周拍摄轿车的十几至几十幅图像，通过自动地对这些图像进行处理分析，包括识别、提取合作标志、重建三维结构、优化处理结果等步骤，可以现场得到整车的三维外形数据，精度达到 0.02~0.05mm。还有诸如商用化的摄像测量产品已从多点测量发展到任意形状的管道等连续形状的测量；利用结构光技术可以快速、高精度地测量复杂外形的表面形状等等。

(3) 摄像测量学的优势和发展前景

1) 高精度、非接触是摄像测量的首要特征

摄像测量通过分析目标图像实现测量目的，属于非接触测量，因而不会对目标的结构特性和运动特性带来任何干扰，测量结果客观、可视、可信。

精度是测量中的永恒主题，摄像测量学方法及其应用系统具有场（面）目标测量精度高的优点。除了完备的光束法平差保证了三维解算的高精度，数字图像分析中各种亚像素方法也使得目标的图像定位精度能够达到十分之一甚至百分之一像素的量级，有效保证了测量结果的精度。

正是由于摄像测量高精度的特点，在武器靶场试验等许多应用中常将摄像测量（在这些场合通常称为“光测”）作为标校雷测等其它测量设备的手段。

2) 运动和动态测量是摄像测量的重要优势

对于时间序列图像，摄像测量除了对单幅图进行分析定位，通常还将考虑运动约束，对物体进行运动参数测量，既测量得到物体对象的静态三维信息，也能够测量物体对象在时空中的变化（运动、变形）信息。这是摄像测量的最重要优势特点之一，也是与传统摄影测量的主要区别之一。

由于时间序列图像多提供了一维时间轴信息，比静态图像处理方法有许多优势，可使得传统方法中一些困难的问题迎刃而解。例如在传统静态处理中，对两幅有较大立体视差的图像，由于图像特征与背景可能有较大变化，同名点配准的可靠性较低。而对序列图像，可以通过特征点跟踪锁定的方法实现同名点配准，可靠性得到极大的提高。

3) 实时测量是摄像测量的重要发展趋势

随着计算机硬件的飞速发展，特别是各类 DSP、FPGA 等小型处理器的发展，以及各种先进的图像处理、分析算法软件的大量涌现和人工智能技术的发展，使得许多摄像测量学任务可以实时或准实时完成。摄像测量已进入了实时处理时代，实时测量的可能与实现为摄像测量学开辟了新的广阔的研究和应用领域，例如实时监测、监控、各种飞

飞行器、车辆等运动平台的视觉导航等。

4) 易于普及更拓宽了摄像测量的发展前景

随着摄像机、计算机等的成本降低和性能提高,使得这些硬件迅速普及,尤其是摄像测量所使用的一次传感器是摄像机和照相机,已得到迅速普及,几乎已经人手一台(手机相机、DC、DV等)。加之摄像测量具有实施简易、适用面广等特点,使得摄像测量技术正在从航天、国防等高端应用向普通民用领域扩展,并必将迎来更大的发展普及。

5) 摄像测量学的技术特点和发展现状

摄像测量学研究从三维场景退化、投影得到的二维图像中恢复、重构出失去的场景三维信息的问题。这是一个不适定的反问题,通常不具有唯一解。三维场景投影到二维图像的过程,不可避免地存在成像系统的投影模型误差、光强转换误差、噪声等影响因素。在对同一场景图像信息的处理和提取中,通常可以有多种方法、算法;而一种图像处理的算法通常只针对该类图像有效,没有一种万能的、普适的图像处理方法和系统。这就造成了一种测量对象,需要研究对应的、特定的方法、算法和系统,除非对不同应用对象提炼出同类的处理对象,例如对不同类的对象有同类的特征点,或贴上相同的合作标志等。

这种问题的多样性、复杂性,决定了对问题处理的多样性。对同一问题的处理,不同的人得到不同的结果甚至不同的结论。因此摄像测量学与图像处理分析类似,更多地是一门技术和应用学科。摄像测量学的发展进步需要高素质研究者们大量的艰苦劳动。

2008年7月在北京召开的第21届国际摄影测量与遥感大会(The XXI Congress of The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing)上,国际摄影测量与遥感协会中与摄像测量密切相关的摄影测量、计算机视觉和图像分析工作组的组长、波恩大学的W. Forstner教授对近景摄影测量学技术的发展现状有一个总结,也反映了摄像测量学的发展现状和水平。这里简要引用他的总结:图像校正问题已经解决;摄像系统内外参数标定已基本解决;三维建模问题正在被解决;建议摄影测量工作者更多地与计算机视觉、模式识别方面的研究成果相结合,多参加这方面的会议,例如:International Congress on Computer Vision (ICCV), 和 Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)等。这说明与三维测量相关的成像几何关系问题已得到了较成熟地发展,而对图像目标的识别、提取和匹配问题是摄像测量技术发展的重点。

(4) 关于本书

作者所在的国防科技大学航天与材料工程学院精密光测图像技术研究中心(正在筹

备组建摄像测量与视觉导航湖南省重点实验室),长期从事基于图像的精密测量与运动测量的研究工作,已有 20 多年历史。以摄像机和测量物体对象是否运动来划分测量模式,我们早期主要进行光测实验力学的微小变形测量、应变、应力测量研究,主要采用光学干涉技术,研究干涉条纹图的处理方法。这部分内容属于像机和测量对象都相对固定的静态测量模式。作者的专业本行是光测实验力学,而力学是研究物体受力与运动的科学,因此,运动学测量自然是实验力学的重要任务之一。20 世纪 90 年代开始,我们重点进行国防试验靶场的基于光测经纬仪、摄像机图像测量运动目标的轨迹、姿态、速度等的运动学测量。这属于像机定点而目标运动的模式。近年来测量摄像平台本身的运动,并进行飞行器视觉导航的方法和技术是我们的主要研究方向。这部分内容属于像机运动而物体对象固定的模式,或者是像机、物体对象两者都运动的模式。在这些研究中我们取得了一系列学术与应用成果。

本书在较系统地介绍、凝练摄像测量学的基本原理和方法的基础上,着重围绕作者所在课题组 20 多年来的科研实践,特别是近十年的科研成果展开论述。除了摄像测量学的经典和前沿理论、方法,还系统总结了作者所提出的一系列新方法、新技术和最新应用成果,包括像机参数标定的系列新方法,单像机测量目标位置姿态参数的系列新方法,像机参数在轨修正及抗扰动测量目标运动参数的新方法,目标匹配、识别和跟踪的系列新方法,飞行器视觉导航系列新方法及其应用,单目运动差交会测量新方法及其应用,折线光路像机链摄像测量新方法及其应用,干涉合成孔径雷达(InSAR)和电子散斑(ESPI)条纹图分析的系列新方法,航天和武器试验等任务中的摄像测量综合应用实例等。并且结合了课题组承担的“飞行器光测图像技术”硕士生课程和“光测图像技术专题”博士生课程的教学内容。在摄像测量学的基础原理部分,在作者《基于图像的精密测量与运动测量》(科学出版,2002 年)一书部分内容的基础上进行了大量的增改。

本书各章节主要内容安排如下。

全书共分为十二章。前两章介绍了摄像测量学的基本知识,包括数字图像的特性、摄像测量硬件方面的知识、常用成像模型和光束法平差、空间交会测量算法的基本原理。第三章介绍了摄像测量系统标定的原理和方法。第四章介绍了高精度提取图像特征的亚像素定位方法原理及算法评价仿真图的制作原理;第五章介绍了目标识别、匹配、跟踪以及数据平滑滤波的基本原理和方法;第六章和第七章分别介绍了目标位置姿态参数和表面形状结构参数的测量原理与方法;第八章介绍了飞行器视觉导航中图像匹配测速测向、着陆引导和交会对接相对运动测量的方法和技术。第九章介绍了应用于大型结构变

形测量、像机扰动修正等的折线光路像机链测量的原理和方法。第十章介绍了基于运动平台单目运动差交会测量目标运动参数的方法。第十一章介绍了用于 InSAR 和 ESPI 条纹图分析的系列滤波方法和 CCI 算法。第十二章介绍了摄像测量学在武器试验、载人航天等方面的应用实例。前七章内容为摄像测量学的基本原理和经典、前沿方法，其中也包含了作者及课题组所提出的一些新方法；后五章内容为作者及课题组在摄像测量学新概念、新理论、新方法及应用研究方面的成果，全部是作者及课题组所做的创新性工作。

国内涉及摄影测量和计算机视觉方面的文献很多，但明确介绍摄像测量的文献很少。我国在这方面的研究工作，尤其是工程、产品化方面的工作还很不够。在国际有关摄像测量的产品博览会上，各种相关产品林林种种，但是具有中国自主知识产权的应用产品却相对甚少。而这类以软件为主的应用型产品本应是我国科技人员的强项。*Vision System Design* 杂志的编辑专门有文分析，“视觉产品展览中中国人在哪里？”，中国的“应用型终端产品很少”。可见研发具有中国自主知识产权的摄像测量应用产品是我国摄像测量界的重要任务，亟需广大科技人员的智慧和努力。

希望本书的出版能够为我国相关领域的科技工作者深入了解摄像测量学，促进中国摄像测量学的研究和推广，推进自主创新，发展出有中国自主知识产权的摄像测量方面的理论、实用化科技成果和产品尽到绵薄之力。

本书内容是作者所在课题组研究成果的总结，是集体智慧的结晶，凝聚着课题组全体老师和学生的心血。其中，孙祥一副教授在三维姿态测量与试验研究方面，张小虎副研究员在靶场目标运动学测量方法与系统方面，雷志辉副教授在飞行器视觉导航技术的研究发展方面，伏思华博士和杨夏博士在干涉条纹图处理分析方法研究方面，都做了创新工作和重要贡献。李立春博士生参加了本书第五章的编写，朱宪伟、张恒、姜广文、晁志超、傅丹、张小苗、周剑、徐一丹、周翔、刘晓春、李强等博士生、硕士生参加了本书部分创新成果的研究工作。曹动先生对图像硬件知识给予了指导。SPIE 美国摄像测量工作组主席 James Walton 博士、德国慕尼黑国防军大学的 Helmut Mayer 教授和 Juergen Peipe 先生对本书工作提出了非常有益的建议。在此向他们致以由衷谢意！

本书的多项研究工作得到国家自然科学基金和国家 863 计划的资助，在这里一并表示感谢！

由于作者水平所限，书中难免存在纰漏及不当之处，敬请读者不吝指教！

参考文献

- [1] Legac A. Videogrammetry or digital photogrammetry: General remarks, methodology, applications[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2350: 16-21.
- [2] Jensen S C, Rudin L. Measure: An interactive tool for accurate forensic photo/videogrammetry[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2567: 73-83.
- [3] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [4] McGlone J. Manual of photogrammetry[M]. Annapolis: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- [5] 张祖勋. 数字摄影测量 30 年[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [6] Forsyth D A, Ponce J. Computer vision: A modern approach[M]. London: Prentice Hall, 2003.
- [7] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [8] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [10] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 尚洋, 李立春, 雷志辉 等. 摄像测量技术在国防试验与航天器对接中的应用研究[J]. 实验力学, 2005, 20(增刊): 91-94.

第一章 数字图像与摄像测量硬件基础

1.1 数字图像的基本特性

数字图像是摄像测量的基本信息载体，采集记录并处理测量对象的数字图像或数字图像序列，从而识别、提取、匹配、跟踪并精确定位对象目标及其特征等，是摄像测量的关键环节之一。因此，了解、掌握和灵活运用数字图像的基本特性，是学习、掌握和使用摄像测量知识技术的基础。随着对摄像测量的深入学习研究，会越来越多涉及有关数字图像处理、图像分析、图像理解等专门课程知识的研究。本书假设读者已经学习掌握了数字图像处理分析的有关知识。鉴于数字图像知识是摄像测量的基础并考虑到本书的完整性，本节简要介绍摄像测量关注的一些数字图像基本特性。

1.1.1 图像及图像的数字化的

图像是对客观世界的一种相似性的生动模仿或描述，通常说的图像是指能为视觉系统或成像传感器所感知的客观世界物体的信息描述形式。图像实质上是客观世界反射或透射的某种能量辐射的空间分布被眼睛或成像传感器记录下来的内容，能够在一定程度上反映客体的某些特性。对于人眼，这种能量形式就是可见光，而对于各种不同的成像传感器，这种能量形式则还可能是红外光（热红外图像）、X射线（CT图像）、超声波（B超图像）以及微波（微波雷达图像）等。

图像所记录的内容与辐射源的强度、波长以及客体的反射、透射能力有关。客体 p 在时刻 t 的成像：

$$I(p, t) = I\{i(p, t), r(p, t), \lambda(p, t)\} \quad (1.1.1)$$

其中 $i(p, t)$ 是反映辐射源强度的入射函数， $r(p, t)$ 是反映客体反射、透射能力的反射函数， $\lambda(p, t)$ 是辐射源的波长函数。这些因素共同决定了图像的主要度量特征：光强度及色彩的时间和空间分布。精密测量应用中通常采用光强图像，又称为灰度图像或黑白图像。一个二维光强函数可由照射和反射模型来描述

$$I(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (1.1.2)$$

即 (x, y) 处的光强由反映环境光强这一外部因素的入射函数 $i(x, y)$ 和反映景物内在特性的反射函数 $r(x, y)$ 共同确定^[1,2]。而如果辐射源 $i(x, y)$ 来自对象内部，则上述 $r(x, y)$ 就代表景物的透射特性。

为了运用各种数学工具、数学算法来处理和分析图像，需要用数学函数来描述一幅图像。由于计算机和数字成像设备的离散特性，需将上述自然界的连续光强图像进行离

离散化，并用离散数学函数进行描述，这就是数字图像。数字化包括两个过程：对图像空间离散化为像素点和对图像光强值离散化为像素灰度。

如图 1.1.1，利用一定的数字成像设备，将连续函数 $f(x,y)$ 在空间上按一定方式离散划分为若干小区域 (x_i, y_i) ($i=0, \dots, M-1; j=0, \dots, N-1$)，每一个小区域称为图像元素(Picture Element，简称为 Pixel)，简称为像素或像点，其中 M 和 N 是图像分别在 x 和 y 两方向的像素个数。在实际成像系统中，每个像素点对应传感器芯片上的一个像元。

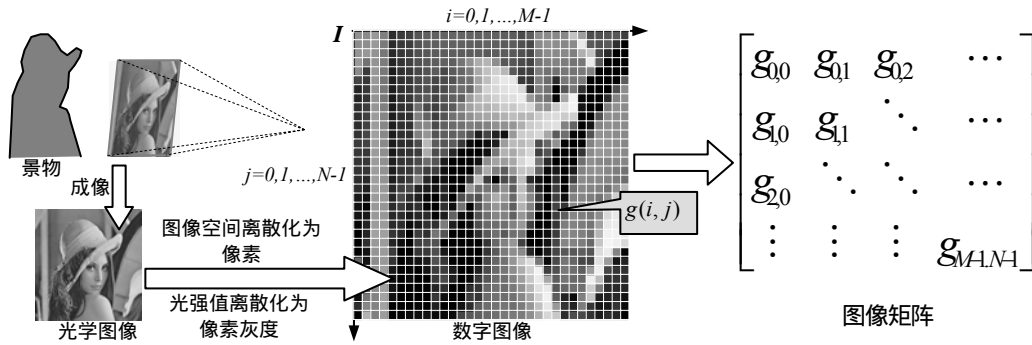


图 1.1.1 对连续光强图像离散化得到数字图像

为了描述数字图像，需要将像素的光强灰度离散量化为有限个级别。一般对像素灰度采取均匀量化，即将图像灰度范围分成 G 个等间隔， G 为灰度的分割级数或量化级数，称为灰度分辨率。为了计算机存储方便，灰度级数通常用二进制的位数 k (比特数) 来表示，即 $G=2^k$ 。 k 常取的值有 8、10 和 16，对应于 256、1024 和 65536 个灰度级数。

经过离散后的数字图像从数学形式上看，就是一个 $M \times N$ 的矩阵。该数学矩阵元素排列的位置 (i, j) ，代表对应像素点在图像上的空间位置，矩阵中元素数值 g 对应于像素点的灰度值。将 $g(i, j)$ 用相应的亮度显示在屏幕上，就得到与自然界图像相似的光强图像。用二维矩阵表示数字图像后，任何可对数学矩阵进行的加、减、乘、除、微分、积分等的数学运算也可以对数字图像进行。

1.1.2 数字图像的基本特性

与摄像测量有关的数字图像的特性主要有：

1) 数字图像是在几何位置和光强分布上对光学图像的离散化，同光学图像一样在几何位置和光强分布上与自然界景象存在一定的相似性，是对景象这些方面特性的一种形象描述。其中景象的几何位置与图像近似成中心投影关系；景象光强与图像灰度级近似成正比关系。

2) 光学图像中景物的灰度分布是连续的。这是由于光照和同一客体本身的反射、透

射特性具有一定的连续性，同时光学成像过程具有低通滤波作用，会使图像变模糊，使得景象中原本呈阶越状的边界部分也会呈现平滑过渡。因而离散化光学图像得到的数字图像中，景物灰度变化一般会通过多级“阶梯”逐步过渡，如图 1.1.2 表示。再如纯黑背景下的纯白亮点，成像后会成为灰度呈高斯分布的亮点。数字图像的这一特性是拟合法边缘定位等目标定位提取算法的依据（第四章将具体介绍这些算法）。

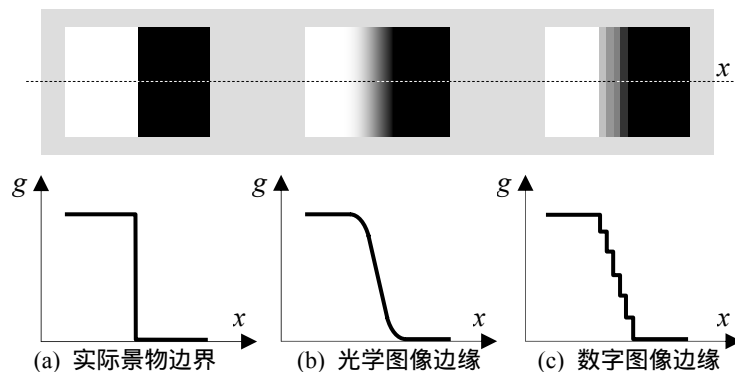


图 1.1.2 实际景物、光学图像、数字图像的边缘灰度分布

3) 数字图像的数学表示是一数字矩阵，因此对数学矩阵的各种数学运算都能够用于数字图像。这些运算包括矩阵的加、减、乘、除、微分、卷积、数学变换以及各种局域运算、分析等等。不同的运算代表着不同的物理意义，根据处理要达到的目的可以设计出相应的算法。

4) 数字图像的采样重建特性^[1,3]

数字图像是用有限的离散像素点来描述实际的连续景物。对于离散的数字图像能够在多大程度上反映实际景象空间分布信息的问题，著名的奈奎斯特（Nyquist）采样定理给出了数字图像采样间隔，即像素空间尺度 Δx 、 Δy ，与图像所能反映的空间特征的最小细节或最高频率之间的定量关系。

奈奎斯特采样定理指出，如果连续信号的最高频谱为 ω_M ，则采样间隔小于 $1/2\omega_M$ 时，能够从离散的采样点完全恢复原信号。成像过程有低通滤波的作用，会滤除实际景象中的高频部分。因而成像信号的最高频率，等于实际场景包含的最高频率与成像系统调制传递函数（MTF）的截止频率两者中的小值。设成像信号 $f(x,y)$ 在对应图像水平和垂直方向的最高频率分别为 u_c 和 v_c ，则根据奈奎斯特采样定理，要求采样间隔 Δx 和 Δy 满足下式的关系，就可以由离散的数字图像来重建 $f(x,y)$ 。

$$\Delta x < \frac{1}{2u_c}, \quad \Delta y < \frac{1}{2v_c} \quad (1.1.3)$$

也就是说，数字图像所能表现的实际景物细节的最高频率为 $1/2\Delta x$ 和 $1/2\Delta y$ ，更高频率的信息会和低频信号发生混迭而丢失。

满足奈奎斯特采样定理仅是丢失高频信息的最低要求。由于图像采集和量化过程会不可避免地在多个环节中引入各种噪声(噪声的产生和影响将在 1.5.2 节进一步说明)，而噪声在理论和实践上是不可能完全滤除掉的，即理想采样是不可能实现的，因此也就无法从数字图像完全重建实际场景的真实成像信息。

5) 图像光强量化中的非线性效应

在采集数字图像过程中，存在着光/电转换和模/数转换两次量化过程，将自然景象的光强变成对应的灰度值。理想情况下，图像灰度值与对应景物光强值是线性正比的关系。但由于成像感光材料性能等因素，实际的光强-灰度曲线通常不是表现为严格的线性关系，而通常是如图 1.1.3 的形式。其中横轴为光强值 I ，纵轴为图像上对应灰度值 G 。可见，在曲线的 BC 段，灰度与光强有较好的线性关系。而在极暗区 AB 段和极亮区 CD 段，灰度与光强的关系是非线性的。在 AB 段，光强低于或接近光敏门限值，处于曝光不足状态，低于 A 值则不能感光成像。 CD 段的光强处接近饱和状态，大于 D 点则处于过饱和状态。在实际采图工作中，应尽量使成像系统工作在光强-灰度曲线的线性区 BC 段。当工作在非线性区时，可用数字图像处理的方法对图像进行灰度标定和修正。

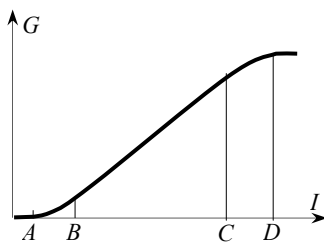


图 1.1.3 曝光特性的光强-灰度曲线

6) 成像的几何畸变现象

在实际光学成像以及离散为数字图像的过程中，图像与自然景象在几何上很难满足严格的中心投影关系，通常存在一定的几何畸变现象。这是影响摄像测量精度的重要因素之一。对此问题将在 1.5.1 节中进行详细的讨论。

7) 成像的灰度噪声现象

成像过程中，不可避免地存在一定程度随机的或确定的噪声，使实际图像灰度并不是根据正常光强-灰度曲线得到的结果，而是存在不确定的灰度畸变。1.5.2 节将对此问题进行详细讨论。

综上所述，一幅数字图像是自然景物的光学特性、环境光场、成像系统等各环节的特性的综合表现。通过数字图像来提取、分析和恢复自然界景物的特性是数学物理中的一个反问题。由于数字图像生成过程中引入了许多不确定的因素，如噪声、畸变等，从而使得该反问题是个不适定的问题，无法得到严格真实的解。特别是对不同的景物、不同的光照环境等，其成像特性都是有差别的，目前还没有对所有图像通用，能够广泛满足后续分析需要的处理算法，因此对不同的应用对象往往需要研究不同的具体算法，而且很难说这些算法能否直接向其它应用推广。对具体问题采用什么处理方法和处理是否成功，更多地取决于研究者的知识、能力和经验，而没有统一的方法。

1.2 数字图像硬件系统简介

普通图像处理分析技术主要用于提高改善图像的视觉效果、识别目标等为目的，它通常只需利用图像本身，而不管拍照此图像的成像系统是什么。然而摄像测量需要从退化的二维图像中提取恢复原景象的三维信息，是逆过程，通常需要用将三维景象投影退化二维图像的摄像机的各种参数和状态等信息。这些信息越多，越有利于物体的三维测量重建。

了解并掌握摄像系统的性能参数和拍摄时状态是摄像测量学与普通图像处理分析专业的一个显著区别之一。因此我们必须掌握好下面的摄像硬件系统知识及其与测量相关的知识。

在实际中，摄像测量系统的组成设备和方法是多种多样的，但是一个图像硬件系统通常都包括五个必不可少的主要部分：光学成像设备、数字化设备、图像存储设备、计算处理器、图像显示和输出设备，如图 1.2.1 所示。将这些功能环节独立或联合设计成产品，就形成不同的硬件产品。例如将 A 、 B 两个环节结合就形成了数字摄像机， B 、 C 两环节结合就形成了一个图像采集板。若将 A 、 B 合并， C 、 D 合并，即图像模拟信号的数字化过程在摄像机中完成，而直接将图像数字信号传入计算机。这种方式是数字图像采集硬件设备的发展趋势。下面简要介绍各部分功能及对应的硬件。

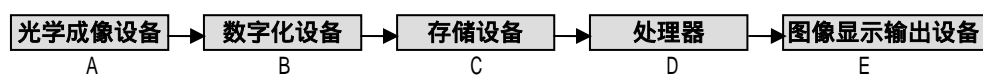


图 1.2.1 数字图像系统的硬件流程图

1.2.1 光学成像设备

将某个电磁能量频段（如可见光、红外光、紫外光、 X 射线等）的信号转化为与接收电磁能量成正比的（模拟）电信号的光敏传感器，及其摄像机、成像镜头组成了光

学成像设备，是摄像测量中最基本的设备。

国内常混用照相机、相机、摄像机、像机等光学成像设备的名称，或用相机来统一全部成像设备。其实它们是有区别的，照相机、相机通常表示拍照静态照片的成像设备，英文为 camera；而摄像机、像机通常表示拍摄动态视频序列图像的成像设备，英文为 video camera 或 digital video。现在的数码相机也有拍视频图像的功能，而摄像机也有拍高分辨率单幅静态图像的功能，两者的区别趋于模糊。但是由于摄像机拍摄动态序列图像的主要特点与摄像测量的动态测量特点相一致，又能与原摄影测量的主要设备照相机相区别，我们推荐在摄像测量中使用摄像机或像机来表示成像设备。

在中文文字中是“图像”还是“图象”也是经常混淆和有争议的问题，现在多数人的意见是：通过像机、相机等成像设备人工得到的是“图像”，而自然的是“景象”。

我们省略已过时的胶片摄影机和电子管摄像机，这里介绍目前占有成像设备绝大部分市场的 CCD 像机和 CMOS 像机。

1) CCD(Charge Coupled Device—电荷耦合器件)像机

CCD 摄像机也称为固态摄像机。它由许多个称为感光像元 (Photosites) 的离散成像元素所构成。在这种感光像元的硅材料晶片表面生成的 PN 结感光面受到外部光照时产生光生电子或空穴，即光生电荷，完成光-电转换，光生电荷量正比于入射光的强弱。于是形成了和输入光强成正比的输出电压。

相对以往的电子管摄像机，CCD 摄像机具有灵敏度高、光谱响应宽、线性度好、动态范围大、结构紧凑、体积小、重量轻、寿命长和可靠性高等优点，因此性价比高。在各个行业都有着广泛的应用。

2) CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)摄像机

CMOS 图像传感器是在当代大规模集成电路 (VLSI) 制造工艺上发展来的光电传感器技术。它的重要特点之一是可以直接访问任意像元，并能对任意像元进行操作运算。因此它具有开任意兴趣区域窗 (ROI, Region of interest)，Binning (一种将相邻像元的感应电荷相加作为一个像素读出的方式，能够提高帧速率和灵敏度) 等许多灵活功能。这使得 CMOS 像机具有体积更小、速度快、读出灵活、可以开窗、功耗低、价格低等优点。

3) CCD 与 CMOS 像机的比较

CCD 和 CMOS 两种图像传感器的感光原理是一致的，二者的区别在于感光后对光生电荷的处理上。CCD 是用电压势阱来约束和收集光生电荷，然后逐行转移串行读出，所以一般芯片采用的电压高，供电复杂，读出速度受限制。而 CMOS 是像素内有电压比较

电路，收集的光生电荷量直接被转换成电压信号的强弱，然后采用与内存访问相同的方式进行行列选择读出。

CCD 与 CMOS 在大部分性能指标上已很接近，它们都满足大部分的应用要求，在正常光照条件下，两者的图像几乎没有人视觉可感受到的区别。因此在正常光照条件下的普通应用，可以不考虑两者的区别。

但是 CMOS 光敏成像时，其暗电流的电子热噪声随时间的累积效应要比 CCD 大，即当曝光时间较长时，CMOS 成像的信噪比（信号与噪声之比，1.3 节将介绍）会降低。CCD 和 CMOS 图像传感器具体性能的比较见表 1.2.1。因此在光照条件不足，目标弱小、成像质量要求高、曝光时间相对长等条件下，CCD 像机比 CMOS 像机仍占有优势。目前科学级的相机仍大多使用 CCD。

表 1.2.1 CMOS 与 CCD 图像传感器的性能比较

性能	CCD 图像传感器	CMOS 图像传感器
暗电流(pA/m ²)	10	10 ~ 100
灵敏度	高	较高
噪声电子数	≤15	≤50
DRNU (%)	1 ~ 10	< 10
像素内放大器	无	有
信号输出	逐个光敏元输出，只能按规定 的程序输出	行、列开关控制，可随机采样， 可实现快速的开窗功能
ADC	片外设置	可片内集成
逻辑电路	片外设置	可片内集成
接口电路	片外设置	可片内集成
驱动电路	片外设置，电路设计复杂	可片内集成

而对高速摄像，因曝光时间短，电子噪声累积效应可忽略，加之 CMOS 本身速度快等原因，高速像机绝大多数采用 CMOS 感光芯片。虽然 CMOS 还有一些弱点，但由于体积小，成本低、功能多、高速成像性能好等重要特点，目前在中低端的摄像机、照相机中，CMOS 芯片的应用已明显超过了 CCD，发展空间很大，具有占领主流市场的前景。

4) 面阵、线阵与点元摄像机

按照感光芯片几何组织形式的不同，摄像机可以分为线阵、面阵和点元三种。线阵感光芯片的像元是一维排列成线阵，每次感光只能得到 $N \times 1$ 像素的一条线上的光学信息，要靠场景和摄像机之间的相对运动来获得二维图像，如各类扫描仪就是利用线阵 CCD 和步进电机的移动来实现图像的扫描。

面阵芯片是由二维排列成面的感光像元组成，可直接得到 $M \times N$ 像素的二维图像。

点元光敏器是将一点或一个区域面的光强全部积分在一个感光像元上，它只能感受光强变化，而不能感受光强的分布情况。若要用它来一维或二维成像，需要将它对景物

进行一维或二维扫描。

5) 增强型 CCD (ICCD)

对应于多种特殊应用需求,出现了各种增强型 CCD。包括光敏度极高,可以在夜间和微弱照明条件下使用的微光型 CCD;专门对特定非可见光波段敏感的红外 CCD 和紫外 CCD;让光线直接从背面入射二极管,大大提高光子效率的背照式 CCD 等。对于它们的原理和性能这里不作介绍,读者可查阅有关书籍和技术手册。

1.2.2 数字化设备

数字化设备是完成将光学成像传感器得到的模拟电信号转化为数字信号的电路器件。它可以集成在成像设备中,也可以独立在成像设备之外。前者就是目前逐渐流行的数字摄像机,后者是各类图像采集板和采集卡(Frame grabber 或 Image card)。而不带数字化设备,输出图像为模拟电信号的像机称为模拟(量)像机。下面简要介绍这两种数字化设备。

(1) 图像采集卡(图像板)

成像设备将采集的视频图像以模拟电信号方式输出时,常有两种输出方式:标准视频信号和非标准视频信号。因此图像采集卡也对应地分为两类:

1) 标准视频图像采集卡

标准视频图像采集卡可采集的标准视频信号有:黑白视频、复合视频(Composite Video)、分量模拟视频(Component Analog Video, CAV)和 S-Video(Y/C Video)等^[4]。其中黑白视频包括 RS-170、RS-330、RS-343 和 CCIR 等。复合视频主要有:NTSC(National Television System Committee), PAL(Phase Alternation Line)和 SECAM(System Election Color Avec Memoire)等制式。我国使用的是 PAL 制式。由于 S-video 传输的图像质量要好于复合视频,因此目前已得到广泛应用。

2) 非标准视频图像采集卡

非标准视频图像采集卡可采集的非标准视频信号有:非标准 RGB 信号、线扫描和逐行扫描信号。采用非标准视频信号通常是为了获得高分辨率、高刷新率的图像或其它特殊要求的图像。例如 CT、MR(磁共振)、X 光机、超声波等医疗影像,要求高分辨率和高传输率,因此这些设备的输出图像一般为非标准视频信号。也有由于成本或速度的限制(如高速摄像等需求)而采用低分辨率非标准视频信号的。

(2) 数字摄像机和数字图像信号采集卡

数字式摄像机是将数字化(模/数)转换功能集成在摄像机内,直接输出数字图像信

号。这样避免了将模拟电信号转化为模拟视频信号，再将视频图像转化为数字图像过程中的图像信息损耗。这种摄像机具有很好的感光像元点和像素点的几何对应性。只要知道了每行的像素点数，就可以确定像素的正确位置，从而避免了模拟视频信号数字化中因水平扫描不能精确同步等而造成的像素抖动等问题。

数字摄像机的输出规格标准一般有 RS-422、RS-644、Camera Link、IEEE 1394 火线 (Firewire)、USB 和千兆网等数字输出接口标准。同时为了保持通用性，有的数字摄像机还带有复合视频输出、模拟 RS-343 或 RS-170 输出。IEEE 1394 接口是 IEEE 标准化组织制定的一项具有视频数据传输速度的串行接口标准。同 USB 一样，1394 也支持外设热插拔，同时可为外设提供电源，支持同步数据传输。千兆网口的摄像机是近年新发展的技术，由于其具有通用连接性和高数据传输率等优点，发展很快，在数字摄像机接口技术上有很好的应用前景。

许多新型数字摄像机都具有与计算机直接通信的功能。摄像机数据线连接计算机后，在计算机上安装驱动程序，就可以直接控制像机。部分像机要通过数字图像卡与计算机连接。计算机为了接收数字图像信号，根据不同的数字摄像机的输出接口规格来选用不同的数字图像采集卡。另外有些采集卡还支持图像的实时显示或模拟信号的输入。

由于不存在像素抖动问题，因此数字摄像机可以获得定位质量高的图像。对于精密测量应用，应尽量选取数字摄像机组成图像采集系统。

1.2.3 图像存储设备

图像存储设备用于暂时或永久存储摄像系统获取的数字图像。主要的存储硬件有：

1) 摄像机自带内存。一些高端像机，特别是高速像机，自身带有大容量的内存体。目前像机内存的容量可以达到几十 G 字节量级。作业时将图像直接存在此内存中，作业后再将图像转存到计算机中。

2) 计算机内存

计算机的内存是一种能提供快速存储功能的存储器。将数字化后的图像直接送到计算机内存中存储，不仅可以使图像采集硬件系统更简单，而且由于内存读写速度很快，可用于实时采集存储图像。

3) 图像采集卡帧缓存

有些图像采集卡上带有一定容量的帧缓存内存，可以暂时存储一帧或多帧的图像。它可以快速进行存储和读取，因此这种带缓存的图像板特别适合高速实时运算处理。

4) 硬盘、光盘、磁带存储器

目前使用的硬盘、光盘和磁带机都可以进行图像的存储。硬盘、光盘、磁带的容量在不断增大，并且光盘、硬盘阵列可满足更大容量存储的需求。

5) 闪存

闪存（优盘）作为一种新型的 EEPROM 内存（电可擦可写可编程只读内存），不仅具有 RAM 内存可擦可写可编程的优点，而且还具有 ROM 的所写入数据在断电后不会消失的优点。由于闪存同时具备了 ROM 和 RAM 两者的优点，从诞生之后起，闪存就成了数码相机、PDA、MP3 音乐播放器等移动电子产品的最佳伴侣。闪存的类型很多，这里不一一表述。

1.2.4 处理器

处理器用于对数字图像进行管理存储、处理和分析，是图像应用系统的主要工作核心。处理器可以是 PC 机、DSP 微处理器、FPGA、或是工作站。在一些需做高速实时处理的图像板上可装有图像处理器、图像加速器、DSP 等微处理器，另外还有一些专供图像处理的处理器芯片或工作站。目前已有一些将像机与 DSP、FPGA 等处理器连接一体的智能像机系统，只需在 DSP 或 FPGA 上写入应用程序就可成为独立的摄像应用系统。

1.2.5 图像显示与输出设备

将数字图像及其处理的中间过程和结果进行显示和输出的设备主要有：

- 1) 电视图像监视器
- 2) 计算机显示器
- 3) 打印机和数码冲印设备
- 4) 像机自带的图像显示器等等。

1.2.6 彩色图像系统

描述彩色图像有多种方式和体系。对于图像显示打印，常用的是 RGB（红、绿、蓝三原色）体系。对于彩色图像处理，最常用的是 HSI（色调、饱和度、强度）体系。对于彩色图像编码传输，常用的是 YUV（亮度、色差）体系，其中 Y 亮度信号可与黑白电视系统兼容，而且这种体系可以有效地压缩数据量，因此被广泛用于各种视频图像编码传输中。通常认为，彩色图像信息对目标识别有益，但对测量定位没有帮助。本书对彩色图像处理的相关知识不做详细介绍。

1.3 摄像系统硬件常用参数术语

下面分别具体定义摄像系统中有关的常用术语。

(1) 摄像机分辨率 (Camera resolution)

摄像机分辨率是指光敏传感芯片的像元总数或行列数，通常等价于最终获得的数字图像的像素数 $M \times N$ ，其中 M 是行方向像素数， N 是列方向像素个数。也有用总像素数直接表达的，例如 200 万像素、1000 万像素。这是摄像机最主要的性能指标。

2) 感光像元尺寸(Pixel size 或 Cell size)

感光像元尺寸是传感器阵列中的感光像元的宽度和高度大小。现在常用的 CCD 摄像机的感光像元尺寸多为 $3\mu\text{m} \sim 16\mu\text{m}$ ，例如常用的摄像机感光像元尺寸有 $6.7\mu\text{m} \times 6.7\mu\text{m}$ 和 $9.0\mu\text{m} \times 9.0\mu\text{m}$ ， 12×12 ， 16×16 等尺寸。CMOS 的像元尺寸通常更小。

3) 传感器芯片面积和成像尺寸(Sensing area)

传感器芯片面积定义为感光成像区域的宽度乘高度，如 $6.4\text{mm} \times 4.8\text{mm}$ 。通常将像元尺寸乘以像元个数（像机分辨率中的 N 或 M ）即得到光敏芯片（靶面）的尺寸和面积，也称为 CCD 或 CMOS 的靶面尺寸。

常有用英寸表示靶面尺寸的习惯，这是延续早期摄像管成像靶面的定义而来，即用成像靶面的对角线长度来衡量，如 $1/2'$ 、 $1/3'$ 、 $1/4'$ 、 $2/3'$ 等，但实际上只有中间部分的靶面能有效成像。许多商用像机按此惯例标注，例如 $1/2'$ 和 $1/3'$ 尺寸的 CCD 芯片的实际成像面积分别为 $6.4\text{mm} \times 4.8\text{mm}$ 和 $4.8\text{mm} \times 3.6\text{mm}$ 。

4) 填充因子(Fill factor)

CCD 或 CMOS 感光像元的实际感光面积与像元面积之比称为填充因子。即在感光像元之间存在一定的间隙。常用摄像机的填充因子通常为 $35\% \sim 100\%$ 。作为精密测量应用，应该尽量选用填充因子为 100% 的摄像机。

5) 摄像机帧频 (速度)

摄像机帧频(速度)是指摄像机每秒能拍摄的图像帧数，单位为帧/秒 (fps , frame per second)。它是摄像机的重要指标之一，常规摄像机的帧频为 $25 \sim 30$ 帧/秒。通常 200fps 以上像机称为高速像机。对于高动态事件的记录，要用高速像机。目前分辨率 $1\text{k} \times 1\text{k}$ ，帧频 1000 或 2000fps ，已成为高速摄像机的主流。通常分辨率高的像机由于数据量大而帧频会降低，可以通过降低图像分辨率提高帧频，因此通常要说明在什么分辨率下的帧频。

6) 光敏感度 (Sensitivity, 光灵敏度)

光敏感度是光敏传感器对景物光强转化为电信号，并进一步转换成数字灰度值的能力，是光敏传感器品质的重要参数之一。光敏感度的定义、指标较复杂，它有两种物理意义和多种表达方式。

一种是指图像传感器所能感知的最低辐射功率（或照度）。即当输出信号的信噪比为 1 时，传感器的最低辐射功率（或照度），单位可用瓦（W）或勒克斯（Lux）表示。

另一种是表示图像传感器的光电转换能力，与响应灵敏度（响应率）的意义相同。对于给定尺寸的传感器芯片，其光灵敏度用单位光功率所产生的信号电流表示，单位可以为纳安/勒克斯（nA/Lux）、伏/瓦（V/W）、伏/勒克斯(V/Lux)、伏/流明(V/lm)。严格说来，这是图像传感器的响应度，即单位曝光量所得到的有效信号电压。

光敏感度是像机在产生有效信号（1DN，digital number）输出时的最低光照强度，或者说是最低多少照度的环境就能敏感到。如参数： $25\text{nW/cm}^2@T_{\text{int}}=33\text{ms}$ 是指光照积分时间为 33ms 时，像机能输出有效信号的最低光强是每平方厘米上光功率为 25nW。

7) 动态范围 (Dynamic range)

图像传感器的动态范围是指传感器工作时能敏感的最小光强和传感器未完全饱和时的最大光强之间的变化范围，由像素的饱和容量和像素的噪声之比决定，它反映了器件能正常工作的输入信号的最大变化范围。

动态范围的数值可以用传感器未完全饱和时的最大光强与能敏感的最小光强之比表示，单位为 dB。对于给定尺寸的传感器芯片来说，分辨率越高，因而像素数越多，导致每个像素的面积减小，从而每个像素的饱和容量减少，因而动态范围变小。相反，同样分辨率的传感器，芯片尺寸越大，对应像素尺寸越大，每个像素的饱和容量增大，动态范围就越大。

8) 信噪比 (SNR, signal noise ratio)

信噪比即信号与噪声之比，用传感器输出的信号的功率与系统（传感器和像机电子电路所构成的整个系统）噪声的功率之比来计量。当相机帧频低时，因为 CCD 暗电流小，长时间曝光累计的噪声小，而 CMOS 传感器较大的暗电流使其噪声累积较大，因此 CCD 像机比 CMOS 像机的信噪比高。相反，如果像机帧频高，需要较高的读出速度时，像机读出电子电路部分的噪声已成为整个系统噪声源的主要贡献，CCD 用来读取数据的相位时钟脉冲难免串扰到图像信号中，使图像噪声增大，信噪比迅速降低。因此高速时，CMOS 像机信噪比优于 CCD 像机。

9) 外同步触发 (Synchronization)

用外部触发信号触发像机拍摄相应的图像。当需要多台像机同时对某动态事件拍摄时，为了使各像机拍到同一时刻的场景，必须对多台像机进行同步触发拍照。同步信号端口是高速像机和许多高端像机的标准配置。

10) 扫描方式 (Scanning Model)

实际摄像机的信号采集和传输有多种不同方式，不同的方式有不同的特点，使用时应给予注意。

1) 隔行扫描

这是广播电视标准像机的扫描次序，称为电视“标准”2:1扫描方式。隔行扫描可以用相对较低的帧速提供人眼视觉感受上更为清晰的图像。如图 1.3.1(a)，它把一帧图像分为奇偶两场，在奇数场时间里读奇数行信号，然后在偶数场时间里又从帧顶开始读所有的偶数行信号。这样提高了显示的刷新频率，利用人眼的视觉暂留特性可以在保持图像分辨率的情况下减少图像的闪烁感。

国际上常用标准视频信号制式有两种：欧洲的 PAL 制和美国的 NTSC 制，它们都采用 2:1 隔行扫描，4:3 的纵横比。PAL 制采用 25 帧速率 (50Hz 场速)，数字化后的帧分辨率是 768×576，25 帧 (50 场)/秒。中国电视制式采用 PAL 制。而 NTSC 制式视频信号采用 30 帧速率 (60Hz 场速)，其数字化图像分辨率为 640×480，30 帧 (60 场)/秒。隔行扫描相机用于高速动态分析时会带来问题。一帧图像相邻的线是在不同时间曝光扫描的，因此一帧图像成像时间内移动的物体在奇数场和偶数场的物理位置会不同，物体运动速度快时会产生严重的重影，从而会劣化成像质量。

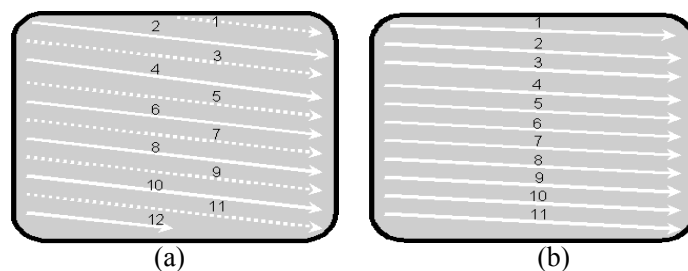


图 1.3.1 隔行扫描和逐行扫描

2) 逐行扫描

逐行扫描像机的图像是从图像的顶部至底部以自然次序逐行扫描。这种成像方式，一帧图像的所有像素是在同一时间内曝光的。当物体运动速度快时，可采用短曝光时间来减小图像的运动模糊。在动态测量应用中，都需要采用逐行扫描像机。

(11) 行转移、帧转移和全帧转移

行转移、帧转移是 CCD 图像传感器在电荷转移时采用的不同方式，与扫描方式无关。CCD 传感器是用电荷势阱来收集光生电荷，然后逐行转移、串行读出以获得图像数据。其芯片设计中有以下三种电荷转移形式：

1) 行转移 (Interline Transfer) CCD

感光单元和存储单元在 CCD 表面相邻排列, 存储单元被屏蔽, 对光不敏感, 感光单元中光生电荷很快被水平转移到相邻存储单元, 然后被垂直转移到输出寄存器, 外部电路从输出寄存器读出电荷并转化成电压信号。行转移是当今广泛采用的 CCD 芯片形式。

2) 帧转移 (Frame Transfer) CCD

这类 CCD 的存储区和感光区是独立的, 感光区产生的电荷被一次性送到存储区, 然后通过转移寄存器送到输出寄存器和外部电路中。

3) 全帧转移 (Full Frame Transfer) CCD

这类 CCD 传感器没有存储单元, 感光单元受光照后产生电荷, 通过外部快门 (机械快门) 关闭, 感光单元不再受光照, 电荷信息被逐行读出到输出结构, 继而被转换成电压信号输出。这类传感器主要用于高分辨率摄像机中。

1.4 摄像测量系统分辨力

摄像测量系统分辨力是指图像在物平面上辨析细节的能力。它主要由成像系统的硬件分辨力、被测物体条件和处理算法等的精度来决定。光学成像系统中的分辨力通常也称为分辨率, 两种称谓区别不大。分辨力的称谓是为了突出系统分辨能力之意。本书对那些直接由单一硬件因素确定的量, 如光敏芯片的像元数 $M \times N$, 仍沿袭传统称谓: 分辨率。而对那些受系统综合因素影响, 例如像机、镜头、算法、视场等系统参数状态、应用对象不同, 而能发生变化的最终系统分辨能力, 称为分辨力。两种称谓区别不大。

1.4.1 成像系统分辨力

成像系统分辨力是指成像系统对空间光学图像的最小细节的分辨能力, 一般用图像物面分辨率或成像系统角分辨率来衡量。

1) 图像物面分辨率

每个像素所代表物面空间的尺寸。设拍摄视场大小为 $W \times H$, 摄像机分辨率为 $M \times N$ (称为硬件分辨率), 则图像物面分辨率为

$$R_x = W / M, R_y = H / N \quad (1.4.1)$$

视场是指对被测物体在垂直光轴 (主视线) 平面上图像所记录场景的尺度。视场是与物距相关的量, 物距越远视场越大。因此图像物面分辨率与物距有关。又称为景物对像面的放大系数 (Magnification)。

2) 成像系统角分辨率

每个像素所代表成像系统的视场角角度。设成像系统的两个方向视场角度为 $\alpha \times \beta$, 则成像系统角分辨率为

$$A_x = \alpha / M, A_y = \beta / N \quad (1.4.2)$$

当镜头焦距与光敏芯片面积或像元尺寸确定后像机的视场角就确定了, 从而角分辨率就确定了。因此成像系统角分辨率与物距无关, 是系统本身的参数。

3) 图像物面分辨率与角分辨率的关系

对于具体的测量对象, 镜头焦距、光敏传感器芯片面积和成像物距决定了成像视场大小。当待测物物体物距确定时, 图像物面分辨率给出了图像中一个像素所代表的感兴趣的空间物面尺寸大小, 因此这时用图像物面分辨率来衡量成像系统分辨率更具有直观性。而对于成像物距不定或变化的情况, 对于镜头焦距一定的成像系统, 其视场角是确定的, 此时则适合用角分辨率来衡量成像系统分辨率。

对于具体的测量对象, 视场、物距一定时, 可以通过提高摄像机分辨率 $M \times N$ 像元数的途径来提高图像物面分辨率。而对于摄像机分辨率确定的情况, 只能通过减小拍摄视场, 即增加焦距或减小物距的方法来提高图像物面分辨率。对于固定镜头焦距的成像系统, 提高成像系统角分辨率的途径是提高摄像机分辨率, 或减小光敏芯片面积。因此, 摄像机分辨率是直接和成像系统分辨率有关的一个重要指标。

图像物面分辨率是决定摄像测量精度的最重要因素。例如航空或卫星图像上的一个像素可能代表地面上的几平方米、甚至几十平方米的大小, 此时基于该图像的测量精度也只能达到对应的量级。但对近景摄像测量拍摄的图像, 如果一个像素代表物面的几个平方毫米, 则其测量精度就可能达到毫米量级。因此设计一个具体测量任务, 首先要确定图像物面需达到的分辨力, 进而确定要达到此分辨力所需要的摄像机分辨率、镜头焦距和视场大小。

1.4.2 影响摄像系统硬件分辨力的因素

影响摄像系统硬件分辨力的主要因素有:

1) 传感器阵列面积和感光像元尺寸

摄像机分辨率除了取决于像元总数外, 还与传感器阵列面积和感光像元尺寸有关。在传感器阵列面积一定的条件下, 感光像元尺寸越小, 摄像机分辨率就越高。但是如果感光像元尺寸太小, 对光敏感度和抗噪性能都有一定的负面影响, 同时加工工艺水平也有限制。通常像元尺寸大, 表明光敏感度高, 信噪比高, 但成本也会增加。因此生产厂家综合多种因素来决定摄像机的分辨率。

2) 模拟像机输出信号制式和图像采集卡

采用标准电视视频信号输出的摄像机分辨率取决于信号的制式和图像采集卡的性能。前面已经对不同视频制式摄像机的分辨率作了介绍。中国采用的 PAL 制标准数字图像分辨率是 768 像素×576 像素，25 帧（50 场）/秒；NTSC 制式的数字图像分辨率为 640 像素×480 像素，30 帧（60 场）/秒。

标准电视图像的重要特征是 2 : 1 的隔行扫描方式，即将一帧图像分为奇偶两场来分别采集、交替显示。对于静态图像，这种隔行扫描与逐行扫描的图像没有区别。但当拍摄运动较快的物体时，采集的图像有模糊、重影的现象。这是因为视频图像的隔行扫描的奇偶两场图像是在不同时刻采集的，图像采集卡将奇偶两场合并为一帧图像，当奇偶场图像存在较大变化时就造成图像的模糊。因此对于快速运动物体的图像应分别按奇场和偶场来处理图像。此时图像的垂直分辨力降低一半，为了维持图像的显示比例，应用插值方法在垂直方向将图像放大一倍。

图像采集卡的质量对数字化图像质量起到重要作用。低端的图像采集卡与高端的图像采集卡将模拟视频信号数字化的图像质量差别很大，在图像的噪声、对比度、像素抖动等方面都有明显区别。

3) 摄像机镜头分辨力

摄像机镜头是成像系统的关键部件之一。由于衍射现象和镜头像差的存在，实际镜头并不是理想的，它的质量直接影响到图像的质量。衡量镜头质量的关键指标是镜头分辨力，即对空间光学图像细节的分辨能力，常用单位长度内能分辨的黑白线对数来衡量，例如：110 线对/mm。镜头实际上具有低通滤波器的作用，高于镜头调制传递函数（MTF）截止频率的信号已经被滤除。这样就使得空间实际景象中的边缘、小目标等含有高频信号的特征被平滑或丢失。因此为了保证数字图像的质量，必须要合理地选用镜头。

高、中、低端的光学镜头的质量有很大的差别，其主要指标就是镜头的分辨力。通常标准定焦镜头的分辨力要优于变焦的镜头，因为变焦镜头中的透镜组要适应、妥协不同焦距的要求，通常难以在各个焦距段都达到最佳。

高分辨率像机必须配以相适应的高分辨力镜头，否则低分辨力的镜头已将图像高频细节信息截止滤除，高分辨率像机根本无法感受这些细节，也就无法发挥高分辨率像机的能力。现在许多号称几百万像素的手机相机拍出的图像还不如几十万像素的相机的图像，劣质的手机相机镜头是其主要制约因素。

1.4.3 处理算法精度

对于具体的测量对象，提高摄像系统硬件分辨力可以直接提高测量系统的精度。但是摄像机的价格是随其分辨力率的增加而成指数上升的，因此靠增加摄像机分辨力来提高测量系统精度的途径是不经济的，并且在技术上是有限的。如果能将图像上的特征目标定位在优于 1 个像素的亚像素尺度级别，则就相当于提高了测量系统的分辨力和精度。例如算法的精度为 0.1 个像素，则测量系统的分辨力就提高了 10 倍。因此亚像素定位技术能有效提高测量的精度，是摄影测量与精密光测图像分析技术中一个重要的特色技术。本书第四章将对亚像素定位技术做详细介绍。

1.5 影响测量精度的几个主要因素

除了上述成像系统分辨力外，影响摄像测量精度的主要因素还有几何畸变、各种噪声和大气抖动影响等。几何畸变主要指图像中目标相对于理想中心投影模型的几何位置误差；噪声是指在光电转换和模数转换过程中引起的随机或确定的灰度上的误差；大气抖动则影响光线的传播过程，使目标成像模糊或成像位置发生偏移。

1.5.1 成像系统几何畸变误差

成像系统的几何畸变误差主要是指成像系统不能使图像与实际景物在全场严格满足针孔成像模型（或中心投影关系），使中心投影射线发生弯曲。针孔成像模型或中心投影是理想的像机成像模型，将在第二章介绍。产生该几何畸变误差有如下几个主要原因：

1) 透镜像差（镜头畸变）

摄像系统必须通过光学透镜组，即镜头才能成像，但是任何光学透镜组镜头都有一定的孔径和视场，不可能使成像严格满足针孔模型成像过程，这种实际镜头成像与针孔成像之间的差别称为透镜像差。透镜像差可粗略分为轴对称像差和非轴对称像差两种。轴对称像差主要有球差、彗差、像散、场曲、畸变、位置色差和倍率色差等；非轴对称像差主要有不对心像差和薄棱镜像差等。

轴对称的畸变像差是最主要的镜头像差。此畸变可分为正畸变和负畸变两种，它们分别对应俗称的枕形畸变和桶形畸变。它是由于一对共轭物像面上的放大率不为常数，使得物体和图像之间失去了相似性而形成的误差。摄像机的焦距变化对此畸变像差影响较大。通常镜头焦距越短，镜头畸变会越大。实际镜头畸变的大小与镜头质量直接相关。尤其是短焦距的广角镜头，镜头畸变像差会更大。一般摄像机镜头在边缘处会有较大的畸变像差。如图 1.5.1 (a) 是一原始理想正交网格图，图 1.5.1(b) 和(c) 分别是(a) 的有枕形畸

变和桶形畸变的图像。

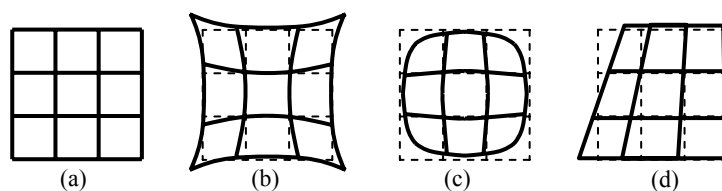


图 1.5.1 畸变前后和有透视误差的网格

2) 感光像元排列误差

成像感光芯片中像元的排列位置可能存在一定的误差，芯片像元是否严格地排列在同一平面上，也会产生误差，这些误差将影响拍摄图像的几何位置。对于扫描仪等线阵 CCD 数字化设备，其扫描方向上的步进运动误差也属于这一类误差。

3) 透视误差

在摄像机装配过程中，可能出现感光芯片平面与摄像机光轴不严格垂直的情况。这会影响图像的几何位置精度，产生透视误差，或称剪切误差。如图 1.5.1(d)所示。

在二维平面测量时，如果物体表平面与摄像机光轴不垂直，或者物体表平面与成像芯片平面不平行，都会产生较大的透视误差。

以上使数字图像产生几何畸变误差的原因中，镜头畸变的影响通常最大，尤其是使用广角镜头时。成像系统的几何畸变误差是多种误差的组合，它们通常是确定不变的，是一种典型的系统误差，是影响摄像测量精度的最重要因素之一。通过系统标定的方法通常可以将此误差消除或抑制掉。在第三章中将详细介绍消除这种几何畸变误差的方法。

1.5.2 成像系统的噪声

图像在成像、数字化和传输等过程中难免会在灰度值上有各种干扰，形成噪声。这些噪声使得图像上像素点灰度值不能正确地反映空间物体对应点的光强值，降低了图像的质量，会影响据此图像进行定位测量的精度。

(1) 图像传感器产生的噪声

图像传感器噪声的表达有多种方式，光电子方面是用等价的光生电子数来表示，称为等效噪声电子数。CCD 的制造工艺和设计都保证了其较低的噪声水平，一般工业级 CCD 传感器噪声在 5~15 个噪声电子水平，科研及天文应用的 CCD 噪声在 3~8 个噪声电子左右，致冷的 CCD 传感器噪声在 0.5~2 个噪声电子水平。

CMOS 传感器噪声相对 CCD 而言比较大。工业级 CMOS 的噪声可控制在 30 个噪声电子以下，现在最好的 CMOS 传感器也可以控制到 5~10 个噪声电子。对于有辅助光源

照明、曝光时间不是很长的成像应用，同类 CMOS 和 CCD 传感器在噪声方面的差距已经很小，不再是影响整个系统性能的主要因素。

成像传感器噪声主要有以下几种类型。

1) 光子噪声(Photon noise)

光子运动具有波粒二相性，因此感光像元在单位时间内接受的光子数目是一个随机数，会在平均值上下做微小波动，从而产生的电荷量也作相应的波动。这样形成的噪声称为光子噪声。这种噪声信号满足泊松分布，即和图像信号不独立，不满足高斯分布。其标准差等于均值的平方根。在低照度，低反差条件下，当其它噪声用各种方法抑制后，光子噪声成为主要噪声，决定了器件的极限噪声水平。

2) 暗电流噪声(Dark current noise)

暗电流是指在无光照情况下，传感器像元因为 PN 结绝缘层漏电而导致的信号电流在一定积分时间内累计的漏电流。这种暗电流导致的噪声，是 CCD 和 CMOS 成像器件所共有的特性，又分为随机噪声和固定模式噪声。

i. 随机噪声或时间积分噪声 (Time Noise)

随机噪声指传感器像敏面在无光照情况下，在时间上累计的噪声的均方根 (RMS) 在 A/D 量化后的等效灰度值。这种噪声来源比较多，常见的有热电噪声、像素读出噪声、杂波噪声、数据量化噪声等。

ii. 固定模式噪声 FPN (Fixed Pattern Noise)

固定模式噪声是每个面阵传感器芯片固有的特性，是传感器每个像元的固定的暗电平偏移偏差。传感器制造过程中，因为工艺因素导致不同区域像素的感光特性参数有一定的差异，特别是某些感光像元位置有缺陷，在无光照输入时，会产生输出差异噪声。对某个传感器而言，这种差异导致的读出图像噪声图案是固定的。

当曝光时间短时，暗电流噪声可以忽略不计。当对弱信号长时间积分观测时，暗电流的影响是致命的。例如将摄像机的镜头盖上，经过一定时间，仍然可以得到一幅图像，即暗电流噪声图像。另外，暗电流还与温度有关，温度越高，热激发产生的载流子越多，暗电流就越大。可以对 CCD 芯片进行冷却来减少这种噪声，温度每降低 20 度，暗电流噪声就降低一个数量级。如在液氮温度下，暗电流可比常温下减小三个数量级。

(2) 视频图像采集卡的像素抖动(Pixel jitter)

如果使用标准视频信号输出摄像机，则在用图像采集卡将模拟视频图像数字化过程中会产生像素抖动，这成为测量系统的主要误差来源之一。模拟视频像机的光敏传感器

也是由 $M \times N$ 像元组成的。这些像元按排列顺序被扫描输出信号, 转变成模拟视频信号, 理论上说, 图像采集卡应将此模拟信号数字化还原成为与原来像元位置对应的像素。但是实际图像采集卡由于多种因素会产生像素位置误差。

1) 行同步相位误差

标准视频信号中只有垂直、水平两种同步信号来分别保证奇偶两场和每行图像达到同步显示。因此要进行视频信号数字化必须要建立精确的像素时钟。一般图像采集卡中用锁相环技术来使视频水平同步和图像卡内部像素时钟的相位一致, 两者相位一致的程度决定了相位误差的大小。这种误差表现为整行像素的整体前移或后移。

2) 频率误差

图像卡内部像素时钟的频率变化产生的误差。在每行的开始这种误差不存在或极小, 但在结束时候可能会变得较大而不可忽略。

3) 像素抖动

由于像素时钟本身的波动而造成了采样时间的变化, 由于视频信号是变化的, 因此产生了像素值对应位置的变化。像素抖动表现为一种随机误差。

通常统称以上三种误差为像素抖动。在多数高档图像卡的技术指标中都有像素抖动的指标, 一般用纳秒(ns)来作为衡量单位。性能好的图像卡像素抖动可小于 1ns。

(3) 其它噪声

还有诸如由于镜头的清洁度而产生的噪声, 如镜头内外部落灰、手印、划痕等引起的噪声等。

1.5.3 数字像机的逐图内参数变化现象

数字像机的数字图像与胶片图像之间有许多明显区别: 用于图像感光的离散化 CCD、CMOS 芯片的像元之间在光敏度、填充率和像元尺寸的不一致性、不平整性等, 这些都是使图像产生误差的因素。

对于高精度的摄像测量, 对数字照相机、摄像机的精细研究发现, 数字图像系统内参数有发生逐幅图像变化的现象 (Image-variant interior orientation, Image-variant parameters)。对非测量专用型的数字照相机、摄像机, 由于成像系统在各次拍照时, 镜头、感光芯片等硬件的固定不绝对牢固, 像机在受到可能的旋转、震动、位置角度变化等影响时, 或是加装了闪光灯、环形灯时, 会发生图像主点或投影中心等微小变化, 这种变化随每一次拍摄而不同。特别是对重量大、尺度长的长焦镜头, 当像机有大旋转和大倾角时, 会产生可明显检测到的这种误差, 其中图像主点变化可以达到几个像素。

德国的 Luhmann、Maas 和 Peipe 等人对这种逐图内参数变化现象进行了细致研究^[5-8]，指出这种像机硬件位置姿态变化主要引起图像主点位置的变化，并会对三维交会测量产生一定的误差。对高精度测量应用需要考虑此项因素。通过对镜头与机身连接的加固，可以减少这种逐图内参数变化误差。

1.5.4 大气抖动的影响

我们知道，在均匀介质里光是直线传播的。但是我们周围的大气环境并不是严格的均匀介质。大气在不同温度、风速、气压、光照、高度等因素下，会有密度变化、抖动、甚至发生湍流。这会使光波的波前发生变化，影响光的传播路径，发生低阶抖动和高阶变形，从而使光成像发生目标位置偏移，成像模糊变形。当光传播距离较近时，这种影响较小，可以忽略。当光在大气中传播距离较远时，这种影响非常明显，必须考虑。

自适应光学的方法和技术就是针对这个问题而发展起来，现在已有了较成熟实用的技术和设备。但是自适应光学技术和设备通常较复杂、昂贵，通常多用于天文观测图像等层面的用途。对于中近距离的摄影、摄像测量中极少用到自适应光学。

根据作者的研究经验，当距离大于二、三十米时，就可以敏感到大气抖动的影响，并且这一影响已达到毫米量级，对某些摄像测量的应用就产生了不可忽略的影响。大气抖动的影响对所有类型的以光作为手段的测量都是同样存在的，包括激光与红外光。这种影响在夏季、强日晒条件下尤为明显。例如建筑工程中的经纬仪和全站仪，观察几十米以外的标尺时，标尺就会发生抖动，需要人为加以判断，确定标尺平衡位置，以消除大气抖动的影响。

对摄像测量中距离尺度达到几十米以上，而精度要求达到 1~2 毫米的应用要特别慎重，因为仅大气抖动影响就会将精度吃掉。采用高帧频摄像机拍摄景物，对目标定位，然后在时域和空域上滤波可以有效减轻这些影响。对于几公里以上的光学测量，大气湍流影响会使目标在图像上的几何位置和光强分布都发生畸变，通常需要专门的大气折射修正措施和环节。对于室内的摄像测量，通常不需要考虑大气影响。

参考文献

- [1] 罗森菲尔德 主编, 李叔梁 等译. 数字图像处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] 章毓晋 编著. 图像处理和分[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [3] 罗永光, 王里生 合编. 信号与系统分析[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1989.
- [4] Murat T A 著. 数字视频处理(Digital video processing 影印版) [M].北京: 清华大学出版社, 1998.
- [5] Hastedt, H., Luhmann, T., Tecklenburg, W. Image-variant interior orientation and sensor modelling of

- high-quality digital cameras[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, , 2002, 34(5): 27-32.
- [6] Maas, H. G. Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung[C]. Publikationen der DGPF, Band 7, Munich: 47-53.
- [7] Tecklenburg W., Luhmann T. and Hastedt H. Camera modeling with image-variant parameters and finite elements[C]. Optical 3-D measurement techniques V, Gruen A., Kahmen H. (Eds): 328-335.
- [8] D. Rieke-Zapp, W. Tecklenburg, J. Peipe, H. Hastedt, T. Luhmann. Performance Evaluation of Several High-Quality Digital Cameras[C]. In: CHEN Jun, JIANG Jie, Alain Baudoin eds., the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Beijing, 2008. Vol. XXXVII, Part B5.

第二章 摄像测量学基本原理和算法

2.1 摄像测量常用成像模型

摄像测量是通过对摄像成像系统拍摄的图像进行分析计算，测量出被测物体在三维空间中的几何参数和运动参数的一种测量手段。拍摄的图像是空间物体通过成像系统在像平面上的反映，即三维空间物体在像平面上的投影。数字图像每个像素的灰度反映了空间物体表面对应点的光强度，而该点的图像位置对应于空间物体表面的几何位置。实际物体位置与其在图像上的位置的相互对应关系，由成像系统的几何投影模型或称成像模型所决定，如图 2.1。成像模型是摄像测量学的最重要基础之一。各种摄像测量任务中，都是基于成像映射关系，确定各种几何与运动参数。

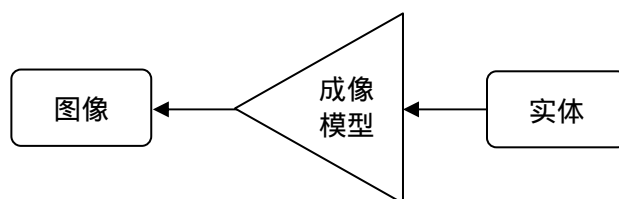


图 2.1 实物到图像通过成像模型的映射关系

摄像成像过程是从三维空间向二维空间（图像）的映射。这种从高维空间向较低维空间的映射关系就是投影。下面简要介绍几种在摄像测量中常用的投影和成像模型。

2.1.1 常用投影模型

投影时，用一组假想的直线（光线）将物体向几何表面上进行投射。该几何表面称为投影平面，这组假想直线称为投影线（或投射线），投影平面上得到的图像也称为投影。在摄像测量学中，按投射方式的不同，常用的投影模型主要有以下三种。

1) 中心投影

投射线会聚于一点的投影称为中心投影。如图 2.1.1(a)所示，投射线的会聚点 S 称为投影中心， P 平面为投影面， SaA ， SbB 等为投射线。 A 、 B 、 C 、 D 为物点， a 、 b 、 c 、 d 称为投影点。摄像机、照相机等成像设备的成像规律近似满足中心投影。

2) 平行投影

投射线相互平行的投影称为平行投影。如图 2.1.1(b)所示，平行投影可以认为是投影中心在无穷远处的中心投影。在平行投影中，若投影线垂直于投影平面，称这种投影为正投影或正射投影。地形图就属于正射投影。

3) 双心投影

双心投影是将两个投影中心和两个投影平面当作一个整体，对同一个物体进行投影，如图 2.1.1(c)所示。双心投影是由两个中心投影结合成的，本质仍属于中心投影。在摄像测量中，有一定重叠度的两张像片，与被测物体构成一个整体，就是双心投影。

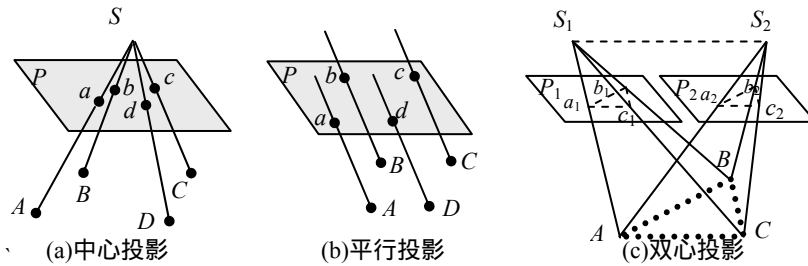


图 2.1.1 常用投影模型示意图

2.1.2 中心透视投影模型及其与透镜成像模型的差别

1) 中心透视投影模型

中心透视投影简称中心投影，也就是针孔模型。中心透视投影模型假设物体表面的反射光或发射光都经过一个“针孔”点而投影在像平面上。此投影中心或针孔称为光心（也称为摄影中心），物点、光心和对应像点在同一条直线上，即满足光的直线传播的条件。图 2.1.2 是中心透视投影模型成像，也就是小孔成像原理示意图。针孔模型主要由光心、成像面和光轴组成。中心透视投影模型中光心到像面的像距 v 称为焦距 f ，物距 u 等于光心到物体的距离。

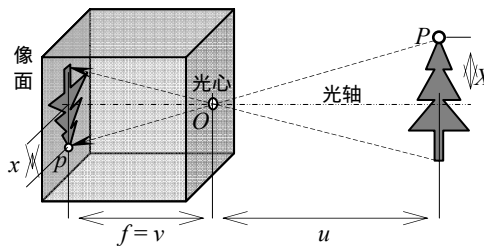


图 2.1.1 中心透视投影模型成像原理

根据中心透视投影的成像过程，物点 P 到光轴的距离 X 与对应像点 p 到光轴的距离 x 之间满足

$$\frac{X}{u} = \frac{x}{f} \tag{2.1.1}$$

这就是中心透视投影的基本关系式。显然这是相似三角形的线性关系。

2) 中心透视投影模型与透镜成像的差别

根据几何光学的基本原理，理想的凸透镜成像光路如图 2.1.2 所示，其中物平面到透

镜中心的距离为物距 U ,清晰成像的像平面到透镜中心的距离为像距 V ,透镜焦距为 F ,三者满足下面的高斯成像公式

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{F} \quad (2.1.2)$$

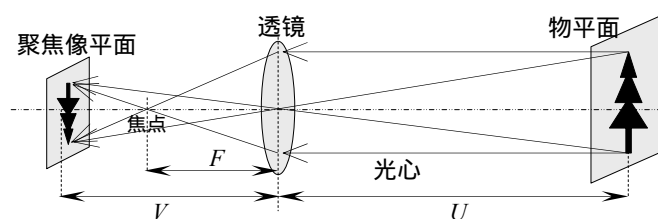


图 2.1.2 透镜成像光路

可见，中心透视投影模型中的焦距与透镜成像模型中的焦距的概念不同，中心透视投影模型中所称的焦距实际上是成像平面到光心的距离。

根据式(2.1.2)，可得

$$F = \frac{UV}{U+V} \quad (2.1.3)$$

可见，当物距 U 远大于像距 V 时，有 $F \approx V$ ，可以用像距来近似焦距。也就是说，只有当透镜模型的物距远大于焦距和像距时，透镜成像模型与中心透视投影模型中焦距的含义近似一致。正因为如此，在采用中心透视投影模型描述成像关系的摄像测量任务中，如果有较高的精度要求，一般不能直接取镜头的标称焦距作为成像模型中的焦距，而要采用通过像机参数标定得到的焦距值。关于像机标定的原理将在第三章中详细介绍。

小孔成像由于透光量太小，实际成像需要很长的曝光时间，很难得到清晰的图像，没有实际应用价值。实际成像系统都是使用透镜组组成镜头，可以透过大量光线并能聚集光线，从而缩短曝光时间和获得清晰的图像。中心透视投影模型中，物、像、物距、像距（焦距）之间存在由相似三角形联系起来的几何关系，它可以最佳地反映像面和物面的相似性，同时又有最简单的表达形式。所以实际镜头中透镜组的复杂设计都是为了既能大光圈地通过大量的光，又能尽可能地满足中心透视投影模型的成像关系。

由于镜头设计的复杂性和工艺水平等因素的影响，实际成像系统不可能严格地满足中心透视投影模型，这种镜头不满足中心透视投影模型的效应称为镜头畸变。这种主要由镜头畸变使得实际成像位置与根据中心透视投影模型给出的成像位置之间存在的偏差称之为像差。由于像差的存在，中心透视投影模型只能是实际成像的一种近似。尤其在使用广角镜头时，远离图像中心处会有较大的成像畸变。因此实际高精度摄像测量中应该尽量采用考虑了像差的非线性成像模型来描述成像关系，这将在 2.1.5 节中详细讨论。

2.1.3 中心透视投影成像关系

(1) 摄像测量常用坐标系

摄像测量常用坐标系一般采用右手准则来定义。图 2.1.3 表示了四个不同层次的坐标系：世界坐标系、摄像机坐标系、图像坐标系和摄像平台坐标系，其定义分别如下。

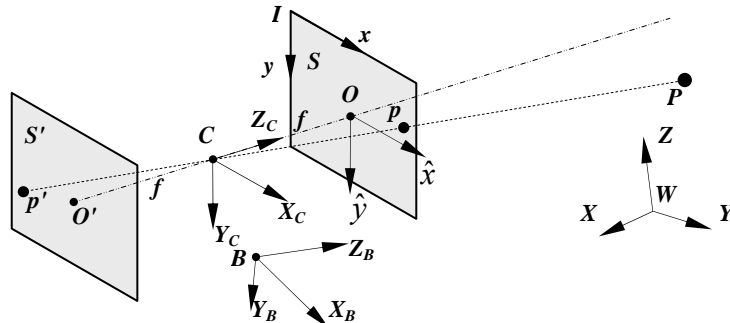


图 2.1.3 摄像测量常用坐标系及中心透视投影成像关系

1) 世界坐标系 $W-XYZ$

也称作全局坐标系，它是由用户任意定义的三维空间坐标系，通常是将被测物体和摄像机作为一个整体来考虑的坐标系。为了使用方便，此坐标系的建立较多地考虑应用环境和对象条件。空间点 P 的位置通常用其在全局坐标系中的坐标 (X, Y, Z) 来描述。

2) 摄像机坐标系 $C-X_cY_cZ_c$

中心透视投影的光心和光轴即摄像机的光心和光轴。摄像机坐标系原点取为摄像机光心， Z_c 轴与摄像机光轴重合，且取摄像方向为正向， X_c, Y_c 轴与下面将介绍的图像物理坐标系的 \hat{x}, \hat{y} 轴平行。图 2.1.3 中， S' 平面为实际成像靶面，称为反片， S 平面与 S' 平面关于光心 C 中心对称，称为正片。反片和正片分别位于摄像机坐标系的 $Z_c = -f$ 平面和 $Z_c = f$ 平面内，其中 f 为中心透视投影焦距。

3) 图像坐标系

在摄像测量学中，为了便于像点和对应物点空间位置的相互换算，图像坐标系通常都建立在正片平面 S 中。图像坐标系又分为图像物理坐标系和图像像素坐标系。

图像物理坐标系 $O-\hat{x}\hat{y}$ 是以光轴与像平面的交点 O 为原点（称为图像主点），以实际物理尺度（毫米、微米等）为单位的直角坐标系。其 \hat{x}, \hat{y} 轴分别与图像像素坐标系的 x, y 轴平行。通常图像物理坐标系原点位于图像的中心或中心附近。

图像像素坐标系 $I-xy$ 是以图像左上角点 I 为原点，以像素为坐标单位的直角坐标系。 x, y 分别表示该像素在数字图像中的列数与行数，与数字图像像素的常用存储格式一致。

图像像素坐标系通常也就称为图像坐标系。

如 2.1.2 节所述，中心透视投影成像的基本关系是所有的成像光线都通过光心，物点 P 、像点 p 和光心 C 三点共线。设物点 P 在世界坐标系 $W-XYZ$ 中的坐标为 (X, Y, Z) 。 P 经中心透视投影得到的像点 p 的图像坐标为 (\tilde{x}, \tilde{y}) 。由于存在像差，实际成像点 (x, y) 与中心透视投影像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 之间会存在偏差，因此，也称中心透视投影像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 为理想像点。

4) 摄像平台坐标系 $B-X_B Y_B Z_B$

在许多应用中，摄像机是安装在某个静止或运动的载体平台上的，而摄像测量的最终目的通常是要给出该平台在世界坐标系下的位置姿态关系，而不是摄像机自身的相对位置姿态。因此定义摄像平台坐标系 $B-X_B Y_B Z_B$ 。该坐标系的建立准则通常与应用任务及平台自身几何结构特征有关，以方便应用任务或与平台几何结构特征有一定一致性为佳。

(2) 像机坐标系与世界坐标系的相对位置姿态关系

两个坐标系之间的相对关系可以分解成一次绕坐标原点的旋转和一次平移。旋转可以有多种表达方式，如欧拉角、旋转向量、四元数等。本书主要采用欧拉角来表示坐标系的旋转。设 $P(X, Y, Z)$ 在像机坐标系中的坐标为 (X_C, Y_C, Z_C) ，则可以用旋转矩阵和平移向量描述 (X_C, Y_C, Z_C) 与 (X, Y, Z) 的关系^[1,2]。

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2.1.4)$$

其中 R 称为旋转矩阵，它是一个 3×3 单位正交阵，它的元素 $r_0 \sim r_8$ 是旋转角 (A_x, A_y, A_z) 的三角函数组合，旋转角 (A_x, A_y, A_z) 定义为将世界坐标系变换到与像机坐标系姿态一致而分别绕三个坐标轴转过的欧拉角。 $T = (T_x, T_y, T_z)$ 称为平移向量，是世界坐标系原点在像机坐标系中的坐标，也就是将世界坐标系原点移至像机坐标系原点的平移量。经过旋转和平移，使得世界坐标系与像机坐标系重合，如图 2.1.4。

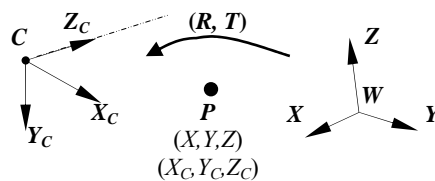


图 2.1.4 用旋转和平移描述世界坐标系与像机坐标系的关系

设世界坐标系绕 X 轴旋转 A_x 得到的旋转矩阵为 R_x ，绕 Y 轴旋转 A_y 得到的旋转矩阵为 R_y ，绕 Z 轴旋转 A_z 得到的旋转矩阵为 R_z 。根据坐标变换关系， R_x 、 R_y 、 R_z 分别为

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_X & -\sin A_X \\ 0 & \sin A_X & \cos A_X \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos A_Y & 0 & -\sin A_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_Y & 0 & \cos A_Y \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos A_Z & -\sin A_Z & 0 \\ \sin A_Z & \cos A_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.5)$$

如果世界坐标系取为导弹、飞机等运动目标的目标体坐标系，则旋转角 A_X 、 A_Y 和 A_Z 分别对应于目标的滚转角、俯仰角和偏航角。

对于相对关系确定的两个坐标系，它们之间旋转矩阵和平移向量各元素的数值也是确定的。但如果规定世界坐标系按不同的旋转次序依次绕各坐标轴旋转，会得到不同的旋转角数值和旋转矩阵表达形式。例如在摄影测量中常用的让世界坐标系 $W-XYZ$ 先绕 Y 轴转 A_Y ，再绕当前的 X 轴转 A_X ，最后绕当前的 Z 轴转 A_Z ，则旋转矩阵 R 为

$$R = R_Z R_X R_Y \quad (2.1.6)$$

容易验证，旋转矩阵 R 是一个单位正交矩阵。式(2.1.6)的 R 各元素的表达式是

$$\begin{aligned} r_0 &= \cos A_Y \cos A_Z - \sin A_Y \sin A_X \sin A_Z, & r_1 &= \cos A_X \sin A_Z, & r_2 &= \sin A_Y \cos A_Z + \cos A_Y \sin A_X \sin A_Z \\ r_3 &= -\cos A_Y \sin A_Z - \sin A_Y \sin A_X \cos A_Z, & r_4 &= \cos A_X \cos A_Z, & r_5 &= -\sin A_Y \sin A_Z + \cos A_Y \sin A_X \cos A_Z \\ r_6 &= -\sin A_Y \cos A_X, & r_7 &= -\sin A_X, & r_8 &= \cos A_Y \cos A_X \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

交换式(2.1.6)中 R_X 、 R_Y 、 R_Z 的次序，可以得到不同旋转次序下旋转矩阵 R 的表达式。

在航空摄影测量中，通常采用旁向倾角、航向倾角和图像旋角来描述世界坐标系与像机坐标系间的旋转关系。如图 2.1.5，旁向倾角 ω 定义为光轴 Z_C 在平面 YZ 上的投影 $Z'C$ 同 Z 之间的夹角；航向倾角 φ 定义为光轴 Z_C 与它在平面 YZ 上的投影 $Z'C$ 之间的夹角；图像旋角 κ 定义为 X 轴在图像平面 $\hat{x} \hat{y}$ 内的投影 X'' 与 X 轴的夹角。由这三个角度表达的旋转矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} r_0 = \cos \kappa \cos \varphi, & r_1 = \sin \kappa \cos \omega - \cos \kappa \sin \varphi \sin \omega, & r_2 = \sin \kappa \sin \omega + \cos \kappa \sin \varphi \cos \omega \\ r_3 = -\sin \kappa \cos \varphi, & r_4 = \cos \kappa \cos \omega + \sin \kappa \sin \varphi \sin \omega, & r_5 = \cos \kappa \sin \omega - \sin \kappa \sin \varphi \cos \omega \\ r_6 = -\sin \varphi, & r_7 = -\cos \varphi \sin \omega, & r_8 = \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

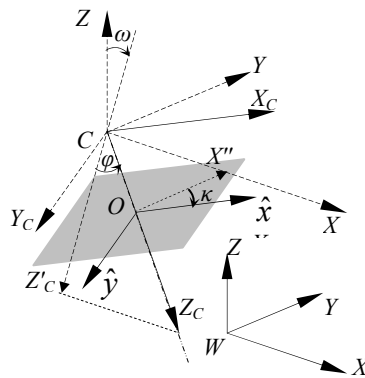


图 2.1.5 航空摄影测量常用的旋转角定义

(3) 像机坐标系与图像坐标系的关系

如图 2.1.6 ,依据中心透视投影模型的基本关系式(2.1.1) ,像点 p 的图像物理坐标 (\hat{x}, \hat{y}) 与物点 P 的像机坐标系坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 的关系为

$$\begin{cases} \hat{x} = \frac{X_c}{Z_c} \\ \hat{y} = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2.1.9)$$

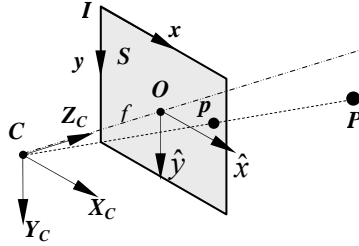


图 2.1.6 像机坐标系与图像坐标系的关系

而像点 p 的图像坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) 与其图像物理坐标 (\hat{x}, \hat{y}) 的关系为

$$\begin{cases} \tilde{x} - C_x = \frac{\hat{x}}{d_x} \\ \tilde{y} - C_y = \frac{\hat{y}}{d_y} \end{cases} \quad (2.1.10)$$

其中, (C_x, C_y) 为图像主点, 即光轴与像面交点 O 的图像坐标; d_x, d_y 分别为摄像机的单个像元在 \hat{x} 与 \hat{y} 方向上的物理尺寸, $\alpha = d_x/d_y$ 称为图像像素纵横比。定义焦距 f 分别与像元的横、纵向尺寸 d_x, d_y 之比为等效焦距 (F_x, F_y) , 从而, 从式(2.1.9)和(2.1.10)得到像点 p 的图像坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) 与物点 P 的像机坐标系坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 的关系为

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} = \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2.1.11)$$

(4) 成像共线方程和中心透视投影矩阵

由于 Z_c 是物点到光心的距离在光轴方向的投影, 因而 $Z_c \neq 0$, 从式(2.1.4)可以得到 X_c/Z_c 和 Y_c/Z_c 的表达式, 将其代入式(2.1.11), 得到

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} = \frac{r_0 X + r_1 Y + r_2 Z + T_x}{r_6 X + r_7 Y + r_8 Z + T_z} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} = \frac{r_3 X + r_4 Y + r_5 Z + T_y}{r_6 X + r_7 Y + r_8 Z + T_z} \end{cases} \quad (2.1.12)$$

这就是描述中心透视投影成像中物点、像点、光心三点共线关系的共线方程。其中

主点和等效焦距是像机的内参数，描述的是像机本身的特性；而平移向量和旋转角、旋转矩阵是像机的外参数，描述的是像机坐标系与世界坐标系间的相对位置、姿态关系。因为中心透视投影关系是线性的，因而以上描述中心透视投影关系的像机的内、外参数也称为像机的线性参数，中心透视投影模型也称为线性像机模型。

用齐次坐标表示空间点和图像点，将式(2.1.11)改写为矩阵形式

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x X_c + C_x Z_c \\ F_y Y_c + C_y Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.13)$$

将式(2.1.4) 改写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.14)$$

将式(2.1.14) 代入式(2.1.13)得到

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.15)$$

定义一个 3×4 阶矩阵 M

$$M = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.16)$$

构成 M 的第一个矩阵由像机内参数组成，称为内参数矩阵，第二个矩阵由像机外参数组成，称为外参数矩阵。因而中心透视投影成像关系可以用矩阵 M 描述为

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.17)$$

矩阵 M 描述了空间点到图像点的中心透视投影关系，称为投影矩阵。将式(2.1.16)展开，可得到投影矩阵各元素为

$$M = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 & m_7 \\ m_8 & m_9 & m_{10} & m_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x r_0 + C_x r_6 & F_x r_1 + C_x r_7 & F_x r_2 + C_x r_8 & F_x T_x + C_x T_z \\ F_y r_3 + C_y r_6 & F_y r_4 + C_y r_7 & F_y r_5 + C_y r_8 & F_y T_y + C_y T_z \\ r_6 & r_7 & r_8 & T_z \end{bmatrix} \quad (2.1.18)$$

由于 Z_C 是物点到光心的距离在光轴方向的投影，因而 $Z_C \neq 0$ 。将式(2.1.17)展开用第三列分别除前两列消去 Z_C ，就得到用投影矩阵各元素描述的共线方程

$$\begin{cases} \tilde{x} = \frac{m_0X + m_1Y + m_2Z + m_3}{m_8X + m_9Y + m_{10}Z + m_{11}} \\ \tilde{y} = \frac{m_4X + m_5Y + m_6Z + m_7}{m_8X + m_9Y + m_{10}Z + m_{11}} \end{cases} \quad (2.1.19)$$

在有些应用领域，描述成像关系时不使用平移向量 T ，而是使用光心在世界坐标系中的坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 和旋转矩阵 R 来作为像机外参数。 (X_0, Y_0, Z_0) 与光心在像机坐标系中的坐标 $(0,0,0)$ 之间的坐标变换关系是

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + T \quad (2.1.20)$$

因而

$$T = -R \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.1.21)$$

将其代入式(2.1.12)，就得到共线方程的另外一种常用形式

$$\begin{cases} \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} = \frac{r_0(X - X_0) + r_1(Y - Y_0) + r_2(Z - Z_0)}{r_6(X - X_0) + r_7(Y - Y_0) + r_8(Z - Z_0)} \\ \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} = \frac{r_3(X - X_0) + r_4(Y - Y_0) + r_5(Z - Z_0)}{r_6(X - X_0) + r_7(Y - Y_0) + r_8(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (2.1.22)$$

共线方程和投影矩阵是摄像测量学中最基本、最重要的关系。几乎所有摄像测量的理论方法都是从这点出发，以此为基础的。我们应该熟练、完整地掌握该方程的原理和方法。

2.1.4 平面场景成像关系

(1) 平面场景成像关系

对于平面场景，中心透视投影成像可以写成较简单的形式。将该平面作为世界坐标系的 W - XY 平面，即对该平面场景中的所有点有 $Z \equiv 0$ 。因而共线方程式(2.1.19)化为

$$\begin{cases} \tilde{x} = \frac{m_0X + m_1Y + m_3}{m_8X + m_9Y + m_{11}} \\ \tilde{y} = \frac{m_4X + m_5Y + m_7}{m_8X + m_9Y + m_{11}} \end{cases} \quad (2.1.23)$$

上式关系也可表示为

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.24)$$

其中的 H 称为映射矩阵, 为

$$H = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_7 \\ m_8 & m_9 & m_{11} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x \\ 0 & F_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & T_x \\ r_3 & r_4 & T_y \\ r_6 & r_7 & T_z \end{bmatrix} \quad (2.1.25)$$

(2) 平面场景多幅图像之间的仿射变换近似

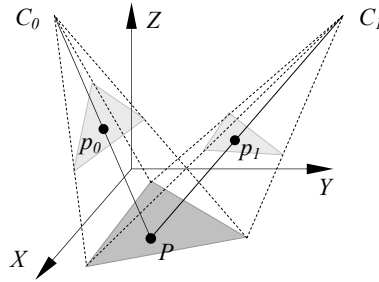


图 2.1.7 对平面场景多次成像

如图 2.1.7, 设世界坐标系的 W - XY 平面中的点 $P(X, Y, 0)$ 在两幅图像中的像点坐标分别为 $p_0(x_0, y_0)$ 和 $p_1(x_1, y_1)$, 两次成像的映射矩阵分别为 H_0 和 H_1 , 根据式(2.1.24)有

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.26)$$

将上式写为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H_0^{-1} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H_1^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.27)$$

因而得到

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H_1 H_0^{-1} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.28)$$

设 $H_1 H_0^{-1}$ 的形式为

$$H_1 H_0^{-1} = \frac{Z_{C0}}{Z_{C1}} \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & h_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 & a_5 \\ a_6 & a_7 & a_8 \end{bmatrix} \quad (2.1.29)$$

其中 $h_0 \sim h_8$ 由两次成像的像机内、外参数决定, Z_{C0} 、 Z_{C1} 为点 P 分别到两次成像光心的距离在光轴方向的投影。如果对该平面场景上各点, Z_{C0}/Z_{C1} 为常数, 从而描述各点两次成像之间关系的 $H_1 H_0^{-1}$ 对该平面上各点相同, 则从式(2.1.28)得到该平面场景上任意点两次成像的像点 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 之间存在变换关系

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_2 \\ a_5 \end{bmatrix} \quad (2.1.30)$$

这是由仿射参数 $a_0 \sim a_5$ 描述的仿射变换关系, 包括平移、旋转、缩放和剪切。为了推导方便, 以上使共面场景中的点都落在世界坐标系的 W - XY 平面上。实际上, 对于任意建立的世界坐标系, 都能够得到同样的结论。当两次成像的光轴与该平面场景垂直, 则 Z_{C0} 、 Z_{C1} 对于该平面上各点为常数, 两次成像之间为仿射变换。当光轴与该平面场景近似垂直, 或者成像视场角度很小, 则该平面上各点在摄像机坐标系中的 Z_C 坐标相近, 对该平面场景的两次成像之间近似满足仿射变换关系。

上述的近似仿射变换关系在平面场景图像匹配、基于平面场景成像估计像机运动参数等任务中有重要的应用。实际自然景物难以完全是平面, 但如果相对于处理算法所涉及到的场景来说, 景物离面的尺度很小, 并且满足上述的两次成像间仿射变换近似条件, 就可以用仿射变换近似描述两次成像之间的关系。

2.1.5 像差模型简介

在上面推导中在假设成像关系满足中心透视投影的前提下, 我们得到了线性成像关系。实际上, 由于镜头设计的复杂性和工艺水平等因素的影响, 实际成像系统不可能严格地满足中心透视投影关系, 会存在镜头畸变, 使光线发生细微偏移。主要由于镜头畸变的存在, 实际成像点 (x, y) 与根据中心透视投影模型给出的理想像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 之间的差别称之为像差 (δ_x, δ_y) , 即

$$\begin{cases} x - \delta_x = \tilde{x} \\ y - \delta_y = \tilde{y} \end{cases} \quad (2.1.31)$$

实验表明, 在高精度测量需求中, 用中心透视投影的线性像机模型来描述成像几何关系不能满足高精度要求, 尤其在使用广角镜头时, 在远离图像中心处会有较大的畸变。因此实际高精度摄像测量中应该尽量采用考虑了像差的非线性像机模型来描述成像关系。通常在得到像差后, 先对目标的实际成像点按式(2.1.31)进行像差修正, 得到理想像点后再进行后续解算。

像差通常分为径向像差和切向像差。径向像差主要包括球面像差、彗形像差、像散和像场弯曲等，切向像差主要包括离心像差和薄棱镜像差等^[3,4]。像差模型的描述方式多种多样，如认为像差以径向畸变为主，可以简化像差，只考虑径向畸变系数。下面介绍一种常用的、比较全面地考虑了径向像差和切向像差的像差模型，它由 5 个像差系数来描述：

$$\begin{cases} \delta_x = x - \tilde{x} = (k_0 x_d + k_1)(x_d^2 + y_d^2) + k_3 x_d^2 + k_4 x_d y_d \\ \delta_y = y - \tilde{y} = (k_0 y_d + k_2)(x_d^2 + y_d^2) + k_3 x_d y_d + k_4 y_d^2 \end{cases} \quad (2.1.32)$$

其中， $k_0 \sim k_4$ 为像差系数， (x_d, y_d) 为像点在水平和竖直方向偏离图像主点的距离与相应等效焦距之比，称为归一化图像坐标，即

$$\begin{cases} x_d = (\tilde{x} - C_x)/F_x \\ y_d = (\tilde{y} - C_y)/F_y \end{cases} \quad (2.1.33)$$

将中心透视投影共线方程式(2.1.12)中的理想像点用式(2.1.31)中的实际像点与像差形式代替，得到实际像点的成像方程为

$$\begin{cases} x = F_x \frac{\bar{X}}{\bar{Z}} + C_x + \delta_x \\ y = F_y \frac{\bar{Y}}{\bar{Z}} + C_y + \delta_y \end{cases} \quad (2.1.34)$$

其中，

$$\begin{cases} \bar{X} = r_0 X + r_1 Y + r_2 Z + T_x \\ \bar{Y} = r_3 X + r_4 Y + r_5 Z + T_y \\ \bar{Z} = r_6 X + r_7 Y + r_8 Z + T_z \end{cases} \quad (2.1.35)$$

这是中心透视投影叠加非线性像差的成像模型，在高精度摄像测量中被广泛采用。

除了式(2.1.32)的像差模型，摄影测量中另有一种常用的像差模型为^[5]

$$\begin{cases} \delta_x = \delta_{x,\text{rad}} + \delta_{x,\text{tan}} + \delta_{x,\text{aff}} \\ \delta_y = \delta_{y,\text{rad}} + \delta_{y,\text{tan}} + \delta_{y,\text{aff}} \end{cases} \quad (2.1.36)$$

其中 $(\delta_{x,\text{rad}}, \delta_{y,\text{rad}})$ 为径向畸变， $(\delta_{x,\text{tan}}, \delta_{y,\text{tan}})$ 为切向畸变， $(\delta_{x,\text{aff}}, \delta_{y,\text{aff}})$ 为仿射剪切畸变。它们分别为

$$\begin{aligned} \delta_{x,\text{rad}} &= \tilde{x} \frac{\Delta r_{\text{rad}}}{r}, & \delta_{y,\text{rad}} &= \tilde{y} \frac{\Delta r_{\text{rad}}}{r} \\ \delta_{x,\text{tan}} &= B_1(r^2 + 2\tilde{x}^2) + 2B_2\tilde{x}\tilde{y}, & \delta_{y,\text{tan}} &= B_2(r^2 + 2\tilde{y}^2) + 2B_1\tilde{x}\tilde{y} \\ \delta_{x,\text{aff}} &= C_1\tilde{x} + C_2\tilde{y}, & \delta_{y,\text{aff}} &= 0 \end{aligned} \quad (2.1.37)$$

其中 r 为当前图像点距图像主点的距离：

$$r = \sqrt{(\tilde{x} - C_x)^2 + (\tilde{y} - C_y)^2} \quad (2.1.38)$$

Δr_{rad} 为 r 的畸变：

$$\Delta r_{\text{rad}} = A_1 r (r^2 - r_0^2) + A_2 r (r^4 - r_0^4) + A_3 r (r^6 - r_0^6) \quad (2.1.39)$$

其中 r_0 一般取为图像半径（图像对角线长度的一半）的 $2/3$ 左右，因为该处径向畸变比较小，是所谓“平衡径向畸变”的位置^[6]。上述的 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 就是该像差模型的像差系数。

2.2 二维平面摄像测量

在实际科研和工程中，许多应用对象分布在同一物平面内，测量对象的几何参数及其运动、变化都在同一平面内，这时用单台像机就可以测量得到各种所需几何和运动参数。根据中心透视投影模型，可以直接导出单台像机测量物平面内目标运动参数的算法。

2.2.1 单像机平面摄像测量基本原理

如图 2.1.5，如果被测物面与像机光轴垂直，即与像面平行，根据中心透视投影关系，显然目标及其所成的像满足相似关系，只相差一个放大倍数。因此只要从图像上提取所需目标的几何参数，乘上实际放大倍数，就得到空间物体的实际几何参数。再结合序列图像的时间轴信息，可以得到物体的运动参数。当物体在同一平面内分布，但是此物体平面与摄像机光轴并不垂直时，若已知光轴与物平面的夹角，可以先通过角度投影变换，将图像校正成像面与物面平行的情况，使两者满足相似关系。

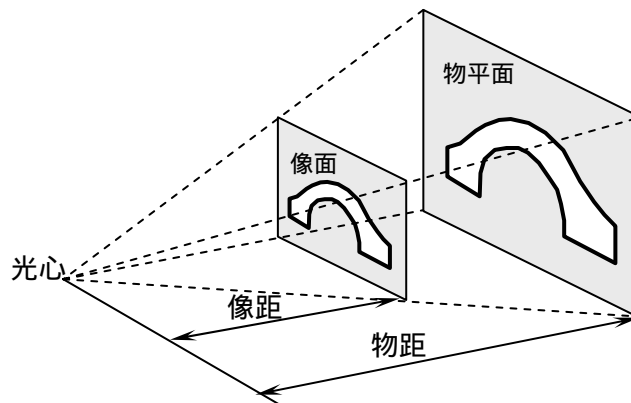


图 2.1.5 单像机平面摄像测量基本原理

常见的二维平面测量主要有物体二维几何位置、尺寸、形状、变形测量、位移和速度的测量。其基本原理是利用单幅图像进行目标几何参数测量，或利用不同时刻在同一

角度拍摄的图像，测量图像目标的变化和运动参数。

在二维平面摄像测量中，放大倍率的确定至关重要。如果物平面内能够提供某个方向上某对象的已知尺寸，则可以得到目标在物平面该方向上的几何或运动参数与目标成像之间的比例关系，完成测量。最常用、简单的方法是在测量物面上放置带有绝对尺度的标尺或参照物，构造前述的已知尺寸，同幅图或事后拍照此标尺或参照物，得到此平面测量放大倍率。

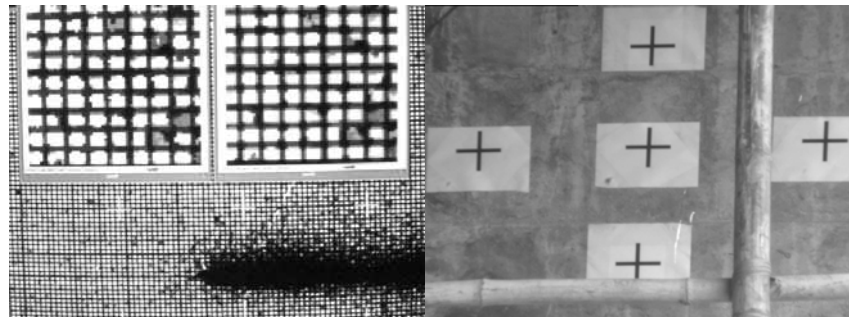
2.2.2 二维平面摄像测量应用实例

1) 胶片、地图、图纸的测量

将胶片、地图、图纸等二维平面图像用照、摄像系统拍照，转换为数字图像，对目标的位置、尺寸、形状或距离的进行提取、测量，再综合考虑实际变换尺度系数，得到实际测量值。这种应用将普通二维平面图像转换为数字图像，可用摄像测量方法对测量对象进行自动、高精度测量。

2) 网格法变形测量^[7~10]

网格法变形测量是古老的光测实验力学测量方法之一。其基本原理是：在待测物体上制作网格标志点，对变形前、后的物体分别拍照网格标志点的图像，分别提取两幅图像上网格标志点的位置并计算相应点位移量，进而计算获得物体在相应位置上的变形。图 2.1.6(a)是用网格法测量边裂纹试件拉伸试验（在 1200℃ 高温条件下）中试件裂纹尖端变形场的网格图，其中上面两幅子图是下面裂纹尖端全场图的局部放大图。通过分析测量各网格节点的变化，可以得到裂纹尖端奇异变形场的分布图。



(a) 裂纹尖端变形场网格图

(b) 桥梁沉降情况单像机摄像测量图像

图 2.1.6 二维平面摄像测量实例

3) 平面运动轨迹测量^[11]

在地面、水面或建筑物侧面上运动的目标，其运动轨迹必然是限定在该平面内的。若将像机垂直于该平面放置，则可以仅用一个固定像机对目标拍照，通过提取分析目标

在图像序列中的位置，加上尺度标定和镜头误差校正，就可以方便地测量出目标的二维运动轨迹、速度。而如果在该测量平面内提供了两个相互垂直方向上的已知尺寸，就可以不要求像机垂直于该平面。如图 2.1.6(b)是单像机测量某桥梁沉降情况的实验图像，其中中间的标志为测量点，上、下和左、右标志间的距离已知，用来计算缩放倍数。通过在各个时刻图像上提取这些十字标志，可以计算测量点在水平和竖直方向的位移量。

2.3 空间点目标三维位置交会测量

2.3.1 交会测量基本原理

如前所述，摄像测量的基本成像模型是中心投影模型，或称针孔模型。在满足针孔模型假设的前提下，像点、光心和物点满足共线方程，即三点共线。对于单摄像机的情况，如果光心和像点已知，就可以确定像点和光心组成的唯一射线，而物点必然在此射线上。此时确定的是过光心的射线相对于光轴的两个方向或角度值，但是物点在此射线上的具体位置无法确定。因此在没有其它附加信息的条件下，仅用单个摄像机是无法确定目标的三维位置的。

当使用两台或多台摄像机从不同的位置对同一目标拍摄时，各个摄像机的光心和其对应同名像点组成的射线应该都通过同一空间物点，即各射线应在物点相交。利用这个原理就可以对空间物点进行交会定位，简称为线-线交会。这就是摄像测量学三维交会定位的基本原理，也就是三角摄影测量的基本原理。

图 2.3.1 为多台摄像机对空间物点 P 成像的示意图，物点 P 为多个摄像机光心 C_i 和相应的像点 p_i 组成的射线的交点。理论上这些射线应该相交于一点。但是由于实际摄像系统与成像模型之间总存在各种误差，特别是图像上目标提取定位误差、摄像系统参数标定误差等，使得这些射线通常不是严格的数学意义上的相交于一点，而只是近似相交于一点。

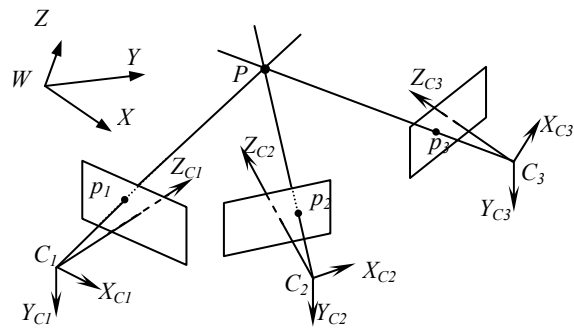


图 2.3.1 多摄像机三维交会原理

对多数摄像测量系统来说，由于成像系统的物距远大于焦距，所以在确定由光心和像点组成的射线过程产生的微小误差，会对远距离的空间交会结果带来很大的误差。“失之毫厘，谬之千里”是对远距离摄像、摄影测量一种形象的描述。因此精确地确定由像点和光心组成的射线是摄像测量的关键。要做到这一点，就必须注重两个关键因素：一是精确地确定摄像成像系统的内外系统参数：如光心、光轴和焦距；二是精确地提取目标对应像点的图像位置。

由此可见，虽然摄像测量的原理很简单，但是要进行高精度的摄像测量，却是一项困难和复杂的工作。测量的核心是精度，本书的主要内容都是围绕着提高测量精度而展开的。本章 2.4 节将介绍通过光束法平差优化得到高精度交会处理结果，第三章中将专门介绍摄像测量系统参数的标定，第四章将介绍高精度提取图像目标的多种亚像素定位算法。只有解决了上面几个关键问题，摄像测量系统和测量方法才能满足高精度测量的需要。

2.3.2 线-线交会基本算法

前面介绍了摄像测量三维定位的线线交会的基本思路、原理，而实现此线-线交会原理的方法、算法有多种。下面介绍在已知摄像机内外参数的条件下，如何交会得到目标三维位置常用的两种基本算法：共线方程交会法和投影矩阵交会法。

1) 共线方程交会法

在已知各个摄像机的内外参数的条件下，设空间目标 $P(X, Y, Z)$ 由第 i 个摄像机拍摄的图像对应点为 $p_i(x_i, y_i)$ ，修正像差后的理想像点坐标为 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 。则共线方程(2.1.12)可以转化为关于待定位点 P 的空间坐标 (X, Y, Z) 的线性方程组

$$\begin{cases} [(\tilde{x}_i - C_x)r_6 - F_x r_0]X + [(\tilde{x}_i - C_x)r_7 - F_x r_1]Y + [(\tilde{x}_i - C_x)r_8 - F_x r_2]Z + [(\tilde{x}_i - C_x)T_z - F_x T_x] = 0 \\ [(\tilde{y}_i - C_y)r_6 - F_y r_3]X + [(\tilde{y}_i - C_y)r_7 - F_y r_4]Y + [(\tilde{y}_i - C_y)r_8 - F_y r_5]Z + [(\tilde{y}_i - C_y)T_z - F_y T_y] = 0 \end{cases} \quad (2.3.1)$$

对于单个摄像机，由于式(2.3.1)表示的方程只有两个，而未知数 (X, Y, Z) 有三个，方程组为不定方程组，没有唯一解。实际上，式(2.3.1)只确定了一条通过像机光心和像点的空间直线，即共线方程中的线。

当 n 台像机 ($n \geq 2$) 进行线-线交会时，式(2.3.1) 的方程个数变为 $2n$ 个，而未知数仍为 3 个，于是可以用最小二乘法对该线性方程组求解。此最小二乘解的几何意义是：交会点到由各个像机光心和像点确定的空间直线族的距离平方和最小。对于两台摄像机交会的情况，其空间交会点是这两条空间直线的公垂线段中点。可见，用共线方程对目标进行三维交会具有清晰明确的物理意义。

2) 投影矩阵交会法^[2]

在计算机视觉领域中，常用投影矩阵元素表达的成像关系式(2.1.19)进行三维交会解算，不需要从投影矩阵分解出像机的各个参数，并且在数学表达式上具有简单明了的特点。

考虑线性成像模型，在得到投影矩阵 M 和不考虑像差的理想像点 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 后，对式(2.1.19)进行移项，即得到关于待定位点 P 的空间坐标 (X, Y, Z) 的线性方程组

$$\begin{cases} (\tilde{x}_i m_8 - m_0)X + (\tilde{x}_i m_9 - m_1)Y + (\tilde{x}_i m_{10} - m_2)Z + (\tilde{x}_i m_{11} - m_3) = 0 \\ (\tilde{y}_i m_8 - m_4)X + (\tilde{y}_i m_9 - m_5)Y + (\tilde{y}_i m_{10} - m_6)Z + (\tilde{y}_i m_{11} - m_7) = 0 \end{cases} \quad (2.3.2)$$

当 n 台像机 ($n \geq 2$) 进行线-线交会时，可以得到由 $2n$ 个方程组成的超定线性方程组，从而可以求解确定空间点的坐标。

投影矩阵 M 是由像机参数得到的，用投影矩阵表达的共线方程式(2.1.19)与用像机参数表达的成像共线方程式(2.1.12)本质上是一样的，因而共线方程交会法与投影矩阵交会法本质相同，只是表达形式不同。与共线方程交会法相比，投影矩阵交会法在数学表达形式上更简洁，而且由投影矩阵 M 表示空间点坐标与它的图像坐标点的关系，不需要分解出摄像机内外参数。由于投影矩阵 M 确定了成像共线关系，可以说 M 矩阵本身也代表了摄像机参数，但这些参数不像焦距、光心、光轴一样有具体的物理意义，而是各摄像机参数的一种综合表示。故此有些文献中称其为隐参数(Implicit parameters)。

2.4 光束法平差

上节中线-线交会计算空间点位置的算法，计算结果对各种噪声很敏感。这是因为对于多数摄像测量系统，成像系统的物距远大于焦距。根据中心透视投影的基本关系，此时像机参数或者像点提取结果误差引起的成像光线方位的微小偏差，会带来明显放大的空间点定位结果误差，如图 2.4.1(a)。而如果从多个方位对多个空间点进行拍摄，如图 2.4.1(b)，要求所有对应物点、光心、同名像点共光线，就可以利用比双目交会测单点多很多的约束。物和像通过光线的联系是摄像测量中的基本关系，联系众多物点及其对应像点的一簇光线就是“光束”。以这样的光束作为基本约束关系，充分利用各种成像约束条件，通过最优求解算法，高精度得到成像关系中各个待求解参数的结果，这就是光束法平差（Bundle Adjustment）。

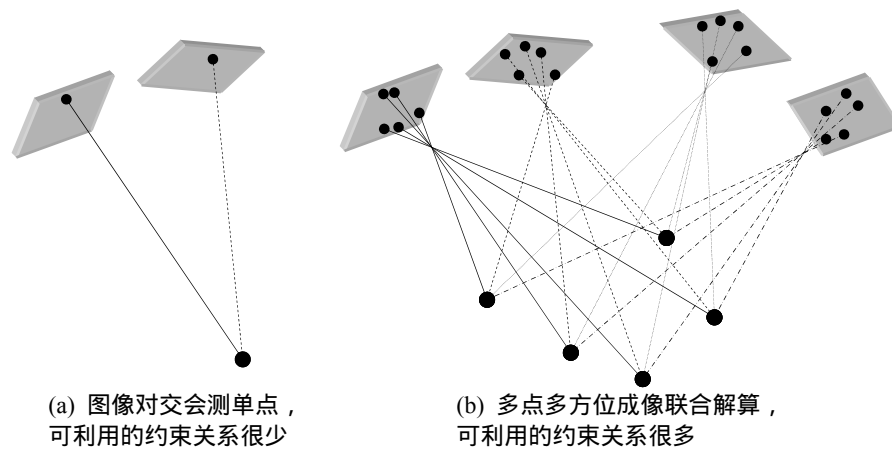


图 2.4.1 摄像测量中的“光束”

光束法平差理论体系完整、模型参数完备、处理结果精度高，是从观测数据高精度地得到最终结果的一类基本方法^[1,12~15]，在摄像测量学中占着非常重要的地位，公认为是各种算法中精度最高的方法。许多摄像测量问题通过先计算初值，再应用光束法平差进行优化求解，得到高精度的测量结果。

2.4.1 测量平差和光束法平差

测量平差（Adjustment）的目的是从观测数据最优地求解未知量，这也是观测的核心任务。平差的基本定义是，依据某种最优化准则，由一系列带有观测误差的测量数据，求定未知量的最佳估值的理论和方法^[16,17]。它是一类处理观测数据的方法，本质上是利

用数据（观测数据、已知数据）间的约束关系，主要地依据最小二乘原理，对观测结果和所关心的参量进行优化和“整合”，是把“差”“平”掉的过程。即测量平差就是调整测量数据，达到最优测量结果的过程。从处理的目的、原理以及使用的数学工具和算法等方面看，“平差”和“最优化”的概念是相通的，共用着或相互借鉴着具体的算法，可以认为是不同领域的工作者对同一类方法的不同称谓。

摄像测量中以图 2.4.1 中的成像光束作为基本约束条件进行平差就是光束法平差。光束法平差充分利用成像关系中的光束约束条件及其它各种可利用的约束关系，在给定初值的基础上，对一选定的系列参数进行优化，使成像系统最好地满足多特征点、多帧图像同时交会的关系。这样求得的结果通常认为是最优精度的测量结果。这些待优化求解的参数称为平差参数，在成像关系中的各个参数：物点、光心、光轴、像点、像差都可以选作为平差参数。

平差和光束法平差是摄影测量学中最重要理论和方法，以摄影测量界为主已对它的具体算法及其应用进行了大量研究，尤其注重在大地测绘、三维地形重建等方面的应用。而在计算机视觉中，目前对平差和光束法平差的研究还比较少。我国计算机视觉领域的学者给“Bundle Adjustment”使用了另外的译名——“捆绑调整”或“捆集调整”^[18]。

根据数学模型和解算过程等，摄影测量学中主要有条件平差法、间接平差法、附有参数的条件平差法、附有限制条件的间接平差法、附有限制条件的条件平差法等多种经典测量平差方法，以及序贯平差、秩亏自由网平差、最小二乘配置、非线性平差等近代测量平差方法。

光束法平差解算中，通常根据像机参数和空间点位置的解算结果，按成像模型重新计算空间点对应的像点坐标，称为对空间点进行重投影，并以重投影结果与实际像点之间的偏差最小作为优化目标函数。平差计算首先列出描述基本观测关系的观测方程，在光束法平差中就是共线方程，同时描述各种附加约束条件的约束方程，并给定各平差参数的初值。上述方程的最优求解多是非线性问题，通常通过泰勒展开对观测方程和约束方程进行线性化，再逐步迭代计算各平差参数的修正值，或称为改正数。如果算法收敛，则迭代计算的各修正值会逐步趋于零。当最后的修正值（或称残差）小到一定程度时，就认为成像关系已经被很好的满足，得到了高精度的计算结果。

2.4.2 摄像测量问题的光束法平差优化求解

(1) 成像关系及观测方程

设摄像测量系统有多台摄像机，每台摄像机在多个方位进行采图，目标对象由多个特征点构成。考虑“光束”中某台摄像机 C 在某一方位对特征点 P 成像的这一条光线，如图 2.4.2。

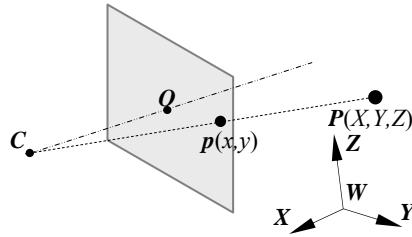


图 2.4.2 平差“光束”中的一条光线

图中 C 为像机光心， O 为图像主点，特征点 P 的像点为 p ，像机的主点坐标为 (C_x, C_y) ，等效焦距为 (F_x, F_y) ，像差系数为 $(k_0, k_1, k_2, k_3, k_4)$ ，将各像机与参考坐标系 $W-XYZ$ 之间的相对位姿参数作为各像机的外参数，包括平移向量 (T_x, T_y, T_z) 和旋转角 (A_x, A_y, A_z) 。旋转角组成的旋转矩阵 R 的元素为 $r_0 \sim r_8$ 。特征点 P 在参考坐标系中的坐标为 (X, Y, Z) ，像点 p 的图像坐标为 (x, y) ， (x, y) 处的像差为 (δ_x, δ_y) 。则成像共线方程式(2.1.34)为

$$\begin{cases} F_x \frac{\bar{X}}{\bar{Z}} + C_x + \delta_x = x \\ F_y \frac{\bar{Y}}{\bar{Z}} + C_y + \delta_y = y \end{cases} \quad (2.4.1)$$

这就是摄像测量光束法平差的观测方程，其中

$$\begin{cases} \bar{X} = r_0 X + r_1 Y + r_2 Z + T_x \\ \bar{Y} = r_3 X + r_4 Y + r_5 Z + T_y \\ \bar{Z} = r_6 X + r_7 Y + r_8 Z + T_z \end{cases} \quad (2.4.2)$$

将像差的表达式和旋转矩阵各元素的表达式代入式(2.4.1)，就得到观测方程的最终展开形式。其中观测值为特征点的图像坐标 (x, y) ，平差参数为实际测量任务中待求的特征点坐标和像机参数等。进行平差解算并不需要每帧图像上都包含全部的特征点，按所提取到的特征点列出观测方程即可。

(2) 约束条件及条件方程

在上述共线方程基础上，依据其它约束条件关系列出与平差参数有关的方程，就是摄像测量光束法平差的条件方程。例如：

某特征点 (X, Y, Z) 在某条直线上，直线方程为

$$\frac{X - X_0}{l} = \frac{Y - Y_0}{m} = \frac{Z - Z_0}{n} \quad (2.4.3)$$

则约束关系式为

$$\begin{cases} l(Y - Y_0) - m(X - X_0) = 0 \\ l(Z - Z_0) - n(X - X_0) = 0 \end{cases} \quad (2.4.4)$$

这样就得到两个条件方程。其它还有诸如某几个特征点共平面、某些特征点间距精确已知等，可分别列出所满足的约束条件方程。

(3) 光束法平差的求解流程

用 S 表示平差参数，将观测方程(2.4.1)记为

$$(S) = L \quad (2.4.5)$$

其中

$$\Phi(S) = \begin{bmatrix} F_x \frac{\bar{X}}{\bar{Z}} + C_x + \delta_x \\ F_y \frac{\bar{Y}}{\bar{Z}} + C_y + \delta_y \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.4.6)$$

由 L 表示的图像点坐标提取结果为光束法平差的观测值。类似的，将条件方程记为

$$\Psi(S) = 0 \quad (2.4.7)$$

给定平差参数的初值 S^0 ，并将观测方程和条件方程在初值处进行一阶泰勒展开，就得到了关于平差参数修正值的线性方程

$$\Phi(S) = \Phi(S^0) + B\delta_S = L + \delta_L \quad (2.4.8)$$

和

$$\Psi(S) = \Psi(S^0) + C\delta_S = 0 \quad (2.4.9)$$

其中 δ_L 是观测值的修正量 $[\Delta x, \Delta y]^T$ ， δ_S 是平差参数 S 的改正数， B 和 C 分别是观测方程和条件方程对平差参数 S 在初值 S^0 处的一阶偏导数，即

$$B = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial S} \right|_{S^0}, \quad C = \left. \frac{\partial \Psi}{\partial S} \right|_{S^0} \quad (2.4.10)$$

线性化的观测方程式(2.4.8)和条件方程式(2.4.9)共同称为光束法平差的函数模型。例如对以特征点坐标和像机全部参数为平差参数的问题，记观测方程(2.4.1)或(2.4.5)的第一式为

$$\varphi_x(C_x, C_y, F_x, F_y, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, T_x, T_y, T_z, A_x, A_y, A_z, X, Y, Z) = x \quad (2.4.11)$$

则线性化观测方程 (2.4.8) 中与之对应的式子为

$$\begin{aligned}
& \varphi_x|_0 + \frac{\partial \varphi_x}{\partial C_x}|_0 \delta_{C_x} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial C_y}|_0 \delta_{C_y} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial F_x}|_0 \delta_{F_x} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial F_y}|_0 \delta_{F_y} \\
& + \frac{\partial \varphi_x}{\partial k_0}|_0 \delta_{k_0} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial k_l}|_0 \delta_{k_l} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial k_2}|_0 \delta_{k_2} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial k_3}|_0 \delta_{k_3} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial k_4}|_0 \delta_{k_4} \\
& + \frac{\partial \varphi_x}{\partial T_x}|_0 \delta_{T_x} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial T_y}|_0 \delta_{T_y} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial T_z}|_0 \delta_{T_z} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial A_x}|_0 \delta_{A_x} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial A_y}|_0 \delta_{A_y} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial A_z}|_0 \delta_{A_z} \\
& + \frac{\partial \varphi_x}{\partial X}|_0 \delta_x + \frac{\partial \varphi_x}{\partial Y}|_0 \delta_y + \frac{\partial \varphi_x}{\partial Z}|_0 \delta_z = x|_0 + \Delta x
\end{aligned} \tag{2.4.12}$$

以最小化 δ_L 为目标函数，以式(2.4.9)为约束条件，最小二乘求解式(2.4.8)，得到平差参数的改正数 δ_S ，并对平差参数 S 在初值的基础上进行修正

$$S^1 = S^0 + \delta_S \tag{2.4.13}$$

即对 S 中的每一项元素都做对应的修正：

$$\begin{cases}
C_x|_1 = C_x|_0 + \delta_{C_x}, C_y|_1 = C_y|_0 + \delta_{C_y}, F_x|_1 = F_x|_0 + \delta_{F_x}, F_y|_1 = F_y|_0 + \delta_{F_y}, \\
k_0|_1 = k_0|_0 + \delta_{k_0}, k_l|_1 = k_l|_0 + \delta_{k_l}, k_2|_1 = k_2|_0 + \delta_{k_2}, k_3|_1 = k_3|_0 + \delta_{k_3}, k_4|_1 = k_4|_0 + \delta_{k_4}, \\
T_x|_1 = T_x|_0 + \delta_{T_x}, T_y|_1 = T_y|_0 + \delta_{T_y}, T_z|_1 = T_z|_0 + \delta_{T_z}, \\
A_x|_1 = A_x|_0 + \delta_{A_x}, A_y|_1 = A_y|_0 + \delta_{A_y}, A_z|_1 = A_z|_0 + \delta_{A_z}, \\
X|_1 = X|_0 + \delta_x, Y|_1 = Y|_0 + \delta_y, Z|_1 = Z|_0 + \delta_z
\end{cases} \tag{2.4.14}$$

在最初的初值处完成以上的解算后，用新得到的平差参数值 S^l 作为新的初值，重复上述解算过程。如此迭代，直至 δ_S 小于给定的阈值， S 结果稳定。

对于比较复杂的摄像测量任务，还可能需要考虑不同观测值的观测效果不同，并赋予不同的权值，再通过加权最小二乘进行平差参数的求解。

图 2.4.3 是以上的求解流程示意图。

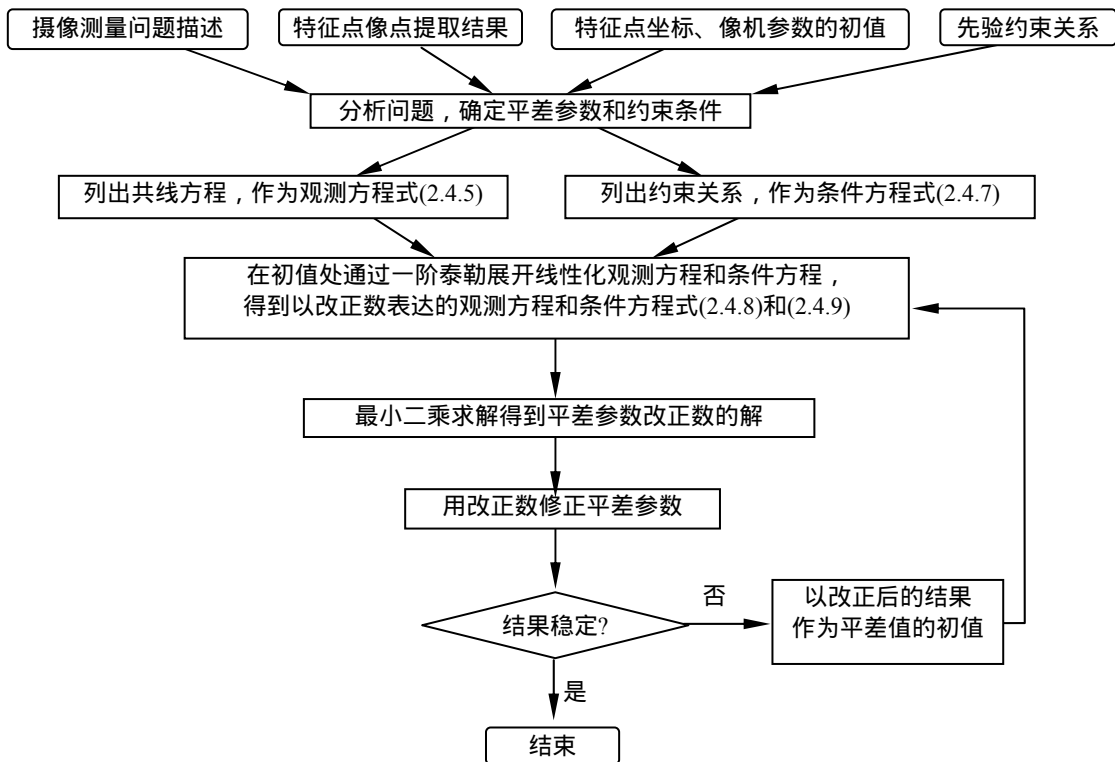


图 2.4.3 摄像测量问题光束法平差求解流程

本节所介绍的光束法平差过程是以空间点在图像上的重投影点与实际像点之间的偏差最小化作为平差优化的目标，这是通常的做法。除此之外，也可以由实际像点和像机参数确定的光线相对于空间点的偏差最小化作为平差优化的目标^[19]。这两类算法虽然所采用的优化目标函数不同，但在平差原理、计算量、解算精度等方面的效果都是相当的，本书不再详述。

除了本节介绍的依据点特征成像进行光束法平差求解外，依据类似原理，也可以用直线等特征的成像关系列出观测方程和条件方程，并进行光束法平差求解。此时不再采用特征点的空间坐标和像点的图像坐标来描述成像关系，而是采用直线等特征的特征参数来描述成像关系^[20]。

(3) 光束法平差与投影矩阵法的比较

直接从投影矩阵出发进行线-线交会或其它参数的计算，称为投影矩阵法。投影矩阵法的优点是算法简单、公式明了、不需要初始值、不需要迭代、计算量小；主要弱点是矩阵中各个分量的物理意义不明确，易受噪声和干扰的影响，测量精度不高。但在计算机视觉学科中，三维测量是以目标识别和改善视觉效果为目的时，这种精度通常是够用的。

而光束法平差具有将成像系统各个成像模型参数直接显式表达、物理意义明确、涉及参数因素全面、理论完备、测量精度高、功能灵活多变等突出的优点；弱点是计算公式较复杂，需要非线性迭代求解，计算量大，特别是需要有待求参数的初始值。

光束法平差可以灵活地选择将哪些参数作为平差值进行修正，这对于许多工程应用非常有意义，特别是对于需要在线修正一些摄像测量系统参数的情况。例如在空间交会对接相对运动参数测量等任务中，由于使用环境温度变化大，环境恶劣，像机焦距、安装状态等参数很容易受到扰动。这将给目标位置、姿态的测量结果带来大的误差，甚至使测量结果不可用，因此需要对这种扰动影响进行修正。采用光束法平差将像机焦距、安装位置、姿态等参数与目标位置、姿态等参数共同作为平差值，“捆绑”在一起进行优化修正，就能够得到与未受扰动时精度相当的测量结果。本书后续章节将介绍这些具体的测量应用。

通常认为，投影矩阵法是计算机视觉学科的典型代表，而光束法平差是摄影测量学的典型代表。如在本书前言中所述，摄像测量学是以摄影测量和计算机视觉两个学科为主的交叉学科，结合了两个学科的优点而形成的。摄像测量中的一个趋势是，先用投影矩阵法得到结果作为初值，再用光束平差法进行优化求解。这样既解决了光束法平差初值获取的困难，又解决了投影矩阵法测量精度低的问题，充分体现了学科交叉的优势。

2.5 空间直线和解析曲线测量法

从 2.3 节的交会测量原理可知，参与交会的不同像机中的各像点必须是空间同一物点的像，也就是同名点交会。在传统摄影测量学中，通常将空间目标以点的形式作为空间三维物体的被测基元。虽然该基元点可以是物体表面任意点，但是为了方便确定、配准不同摄像机图像中的同名点，通常选取物体表面的特征点（如物体的角点、交叉点等），这些特征点的图像特征通常与周围灰度有较大反差，容易识别、匹配，且定位精度高。

理论上，空间物体表面的各种几何元素都可以作为基元，如多面体的棱边、长形体的中轴线、圆柱体底面的椭圆曲线等。用 2.3 节空间点的三维定位方法，可以将各种形式基元上的点逐点定位，再用曲线拟合等方法得到基元。但由于直线、曲线在图像上由很多点组成，并且线型特征具有一维性，在直（曲）线切线方向上灰度变化很小，在不同像机图像上难以准确确定同名点。因此，用确定点的方法来确定空间直线和曲线，不仅处理困难，而且难以达到高精度。因而传统摄影测量学通常只测量点目标，而难以测量线基元等目标。

摄像测量利用数字图像处理分析技术，通过多种数学模型处理可以大大扩展摄影测

量线-线交会原理的应用范围，实现面-面交会，锥体-锥体交会，以及直接对空间三维曲线进行迭代定位等新方法。这些方法打破了传统摄影测量的模式限制，扩展了可测量范围，并且提高了测量精度。下面介绍以直线和空间解析曲线为基元的三维交会测量方法。

2.5.1 空间直线的三维交会测量

(1) 共面方程面-面交会确定空间直线^[21,22]

如图 2.5.1 所示，若空间有一条直线 S ，由两台摄像机观察到它的两幅图像分别为直线 s_1 和 s_2 。从解析几何中知道，空间一条直线和一个点在空间上唯一地确定一个平面。根据中心透视投影成像关系，图像直线 s_1 和 s_2 上所有点的成像光线必然要全部通过各自对应的光心，因此 s_1 和 s_2 分别与 C_1 和 C_2 各自确定了空间平面 S_1 和 S_2 ，而平面 S_1 和平面 S_2 的交线唯一确定了空间直线 S 。具体算法如下。

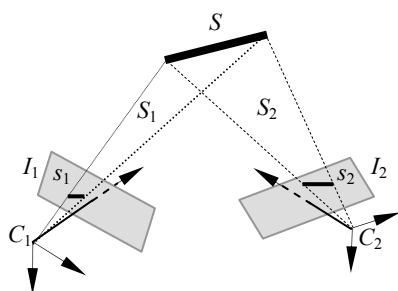


图 2.5.1 面-面交会确定空间直线原理

首先将第 i 个摄像机的图像上的直线提取出来，并确定该直线在图像上的方程为

$$a_i \tilde{x} + b_i \tilde{y} + c_i = 0 \quad (2.5.1)$$

将共线方程(2.1.12)中像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 的表达式代入上式，可得

$$A_i X + B_i Y + C_i Z + D_i = 0 \quad (2.5.2)$$

其中 $A_i = a_i F_x r_0 + a_i C_x r_6 + b_i F_y r_3 + b_i C_y r_6 + c_i r_6$ ， $B_i = a_i F_x r_1 + a_i C_x r_7 + b_i F_y r_4 + b_i C_y r_7 + c_i r_7$ ， $C_i = a_i F_x r_2 + a_i C_x r_8 + b_i F_y r_5 + b_i C_y r_8 + c_i r_8$ ， $D_i = a_i F_x T_x + a_i C_x T_z + b_i F_y T_y + b_i C_y T_z + c_i T_z$ 。

当摄像系统的内外参数已知时，在确定了图像直线方程(2.5.1)后，式(2.5.2)中的系数 A_i, B_i, C_i, D_i 是常数，因此该表达式为世界坐标系下的空间平面方程。该平面由摄像机光心 C_i 与图像直线 s_i 确定。因此图像上一条直线与对应光心唯一确定一个空间平面，并且根据中心透视投影关系，空间直线目标必然在此平面内。故式(2.5.2)可称为物线、光心和像线的共面方程。它与前面的物点、光心和像点必须共线的共线方程一样，是摄影测量学的基本成像关系。

将两个或多个摄像机确定的共面方程联立求解，就可以交会得到空间直线 S 。实际上，

两个空间平面方程联立本身就是空间直线的一种描述形式。与线-线交会确定空间点相对应，上述过程称为面-面交会确定空间直线。在此面-面交会过程中，各图像上的直线段并不需要对应于空间直线的同一直线段，这是由于数学上的直线为无限长，直线的不同部位具有同一数学表达式。这个特性给实际应用带来很大方便。

(2) 投影矩阵交会确定空间直线

图像直线式(2.5.1)可以用向量形式表示为

$$\begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.5.3)$$

将用投影矩阵描述的中心透视投影关系式(2.1.17)代入上式，得到

$$\begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.5.4)$$

这就是用投影矩阵形式表达的由图像上一条直线与对应光心唯一确定的空间平面，即共面方程，它与式(2.5.2)实际上是相同的。将两个或多个摄像机确定的共面方程联立求解，就可以交会得到空间直线 S 。这一交会求解过程中，只需要用到投影矩阵 M ，而不需要从中分解出具体的像机参数。

2.5.2 空间解析曲线的三维测量

根据 2.5.1 节的平面与平面相交确定空间直线的原理，可以很自然地推出曲面与曲面相交确定空间解析曲线的方法，特别是各种锥面与锥面相交确定圆、椭圆等空间曲线的应用。空间曲线的描述参数多，例如描述一个空间椭圆的独立参数有 8 个之多，用尺子等常规方法是难以测量确定的，而摄像测量是对这类复杂目标测量的最有效手段。

除了面-面交会的方法外，K. Andresen 和本书作者提出了一种精度更高的确定空间解析曲线的方法^[23~25]。它的基本思想是先确定空间解析曲线，例如直线、圆、椭圆等的数学参数形式，然后建立各摄像机的图像曲线上各点通过各自光心射向空间曲线的射线，并将这些射线与空间曲线的距离之和最小化来确定曲线的解析参数。这种方法是前面光束平差法原理的一种推广，它得到的空间曲线几何参数比上述面-面交会法的结果精度更高。

下面简要介绍用这种方法确定空间任意椭圆的算法。对直线、圆等其它空间解析曲线可用类似的原理来确定。

(1) 空间椭圆的描述

首先确定在世界坐标系 W - XYZ 下描述空间任意椭圆的参数形式。我们知道，一个空间椭圆可由以下的几何参数确定：指向椭圆中心 M 的矢量 $\vec{m} = [X_m, Y_m, Z_m]^T$ ；椭圆平面的法向单位矢量 $\vec{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ ；椭圆长半轴和短半轴的单位矢量 $\hat{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ 和 $\hat{b} = [b_x, b_y, b_z]^T$ ；椭圆长、短半轴的绝对长度 a 和 b 。则椭圆长轴矢量为 $\vec{a} = a\hat{a}$ ，短轴矢量为 $\vec{b} = b\hat{b}$ 。如图 2.5.2 所示，椭圆上的任意一点 E 的空间坐标 \mathbf{X}_E 可以用角度 θ 表示为如下的形式：

$$\mathbf{X}_E = \vec{m} + \vec{a} \cos \theta + \vec{b} \sin \theta = \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + [\hat{a} \ \hat{b} \ \vec{n}] \begin{bmatrix} a \cos \theta \\ b \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5.5)$$

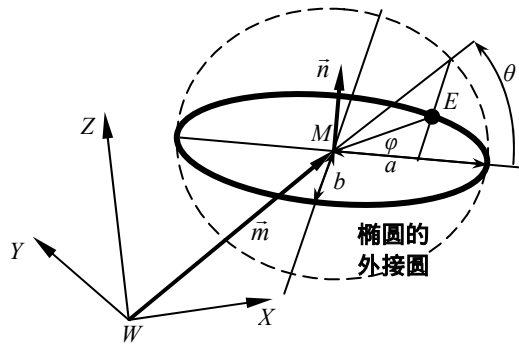


图 2.5.2 空间椭圆的数学描述

由于单位向量 \hat{b} 可由如下叉乘来表示

$$\hat{b} = \vec{n} \times \hat{a} \quad (2.5.6)$$

因此一个空间椭圆可由下列具有 11 个元素的向量 P 来描述

$$P = [a, b, n_x, n_y, n_z, a_x, a_y, a_z, X_m, Y_m, Z_m] \quad (2.5.7)$$

这 11 个分量并不完全独立。为了得到唯一解，必须同时考虑如下约束条件

$$\vec{n} \cdot \vec{n} = 1, \quad \hat{a} \cdot \hat{a} = 1, \quad \vec{n} \cdot \hat{a} = 0 \quad (2.5.8)$$

由上式可知， \vec{n} ， \hat{a} 为单位向量，并且两向量垂直。因此实际独立的参数数目减为 8 个。但从数值计算方便和物理意义明确的角度来考虑，我们选用上述 P 向量来描述空间椭圆，同时将 3 个约束条件在最小二乘求解中作为拉格朗日条件来考虑。

(2) 计算光线射线与空间椭圆的距离矢量

如图 2.5.3，只要事先知道向量 P 的一个适当的初始值，对于图像上椭圆线上的任意点 Q ，从 Q 点通过摄像系统光心（投影中心）的射线理论上将通过空间椭圆线。但由于

图像点提取误差、像机参数标定误差等，该射线会偏离空间椭圆线一定距离，这个距离称为残差。我们将该残差之和最小化作为对向量 P 的最小二乘拟合与迭代中的目标函数。

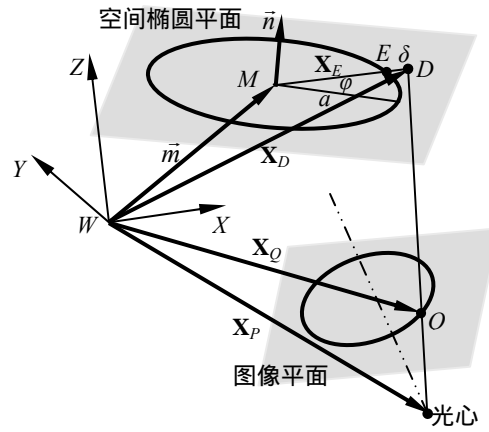


图 2.5.3 光线射线与空间椭圆间残差的建立

至少可以建立三种不同的残差距离形式。也许最准确合适的残差距离形式是射线到椭圆边界线 E 的空间最短距离。但是这种距离无法表达为一种封闭形式。并且因为计算 E' 已经需要非线性方程组，无法使在后面将要用的偏微分得到封闭形式。第二种距离的表达方式是在空间椭圆平面上确定从射线与平面交点 D 到椭圆的最近距离。但这种方法需要使用非线性数值迭代来进行求解。

我们采用第三种距离表达式，它可以得到封闭的形式。定义从 Q 点通过光心的射线与空间椭圆平面交点 D 与椭圆和直线 DM 的交点 E 之间的距离作为残差 δ 的表达。这种残差表达式经过实际试验验证具有较好的最小二乘数值计算稳定性，并有较好的求解精度。

如图 2.5.3 所示，在给定一个摄像中心的矢量 X_P 、图像上任一点 Q 的矢量 X_Q 、空间椭圆中心 M 的矢量 \vec{m} 和椭圆平面的法线矢量 \vec{n} 等条件后，交点 D 的坐标矢量为

$$X_D = X_P + \frac{(\vec{m} - X_P) \cdot \vec{n}}{(X_Q - X_P) \cdot \vec{n}} (X_Q - X_P) \quad (2.5.9)$$

得到 X_D 后，则从 D 点到椭圆中心 M 的矢量的单位矢量 \hat{X}_d 可以从 $X_D - \vec{m}$ 中得到。则 \hat{X}_d 与长轴 a 之间的角度 φ 满足如下关系

$$\cos \varphi = \hat{X}_d \cdot \hat{a}, \quad \sin \varphi = \hat{X}_d \cdot \hat{b} \quad (2.5.10)$$

如图 2.5.2 所示，在式(2.5.5)中的角度 θ 与 φ 之间满足

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{a}{b} \operatorname{tg} \varphi \quad (2.5.11)$$

将上式带入到式(2.5.5)中,使 X_E 成为 φ 的函数。这样对应于图像上任一椭圆边缘点 Q_i 的残差 δ_i 可表示为

$$\delta_i = \mathbf{X}_{D_i} - \mathbf{X}_{E_i} \quad (2.5.12)$$

该残差模型就是本方法的优化目标函数,它是参数向量 P 的非线性函数。

(3) 最小化目标函数求解椭圆参数

为了求解该模型的最小残差,将此模型对每一幅图像的每一个点 Q_i 的残差方程线性化:

$$\left. \frac{\partial \delta_i}{\partial P} \right|_{P_0} \Delta P_0 = -\delta_{0i} \quad (2.5.13)$$

其中 P_0 是向量 P 的初始值。上式可展开为

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial \delta_i}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial \delta_i}{\partial n_x} \Delta n_x + \frac{\partial \delta_i}{\partial n_y} \Delta n_y + \frac{\partial \delta_i}{\partial n_z} \Delta n_z + \frac{\partial \delta_i}{\partial a_x} \Delta a_x + \frac{\partial \delta_i}{\partial a_y} \Delta a_y + \frac{\partial \delta_i}{\partial a_z} \Delta a_z + \frac{\partial \delta_i}{\partial X_m} \Delta X_m + \frac{\partial \delta_i}{\partial Y_m} \Delta Y_m + \frac{\partial \delta_i}{\partial Z_m} \Delta Z_m = -\delta_{0i} \quad (2.5.14)$$

其中的 δ_{0i} 依赖于初始值 P_0 的残差。上面各项偏导数相对较复杂,但都有精确的表达式。 $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta Z_m$ 是向量 P 各元素的增量。定义一个矩阵 A , 它的每一行由每个点的残差方程的各个偏导数项组成,再定义向量 r , 它由上式的右边项 $-\delta_{0i}$ 组成,则对于向量 P 的增量可给出一个冗余的线性方程组

$$A \Delta P = r \quad (2.5.15)$$

同样可将约束条件式(2.5.8)线性化为

$$\begin{cases} n_x \Delta n_x + n_y \Delta n_y + n_z \Delta n_z = -(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 - 1) / 2 \\ a_x \Delta a_x + a_y \Delta a_y + a_z \Delta a_z = -(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 - 1) / 2 \\ a_x \Delta n_x + a_y \Delta n_y + a_z \Delta n_z + n_x \Delta a_x + n_y \Delta a_y + n_z \Delta a_z = -(n_x a_x + n_y a_y + n_z a_z) \end{cases} \quad (2.5.16)$$

并可以写成

$$B \Delta P = C \quad (2.5.17)$$

用最小二乘法原理可以得到下面的超定方程组

$$\begin{bmatrix} A^T A & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T r \\ C \end{bmatrix} \quad (2.5.18)$$

其中 κ 是最小二乘约束条件的拉格朗日参数。求解上式得到增量 ΔP 后,就可对初始参数 P_0 进行修正

$$P_1 = P_0 + \Delta P \quad (2.5.19)$$

对上述过程进行迭代，直到 ΔP 值小于给定的门限值。所得到的 P_n 就是空间椭圆参数的解。

在上述求解过程中，如何事先得到向量 P 的初始值 P_0 是至关重要的。初始值 P_0 取得不好可能会引起迭代不收敛。对空间椭圆的初值确定有多种方法，本书不作具体介绍。

上述方法是由多台摄像机图像上椭圆的边界点同时对空间椭圆模型的参数进行交会，使交会偏差最小化的最小二乘求解。这是 2.4 节所介绍光束法平差的一种具体应用，是典型的摄像测量方法。对它的学习可以加深对光束法平差的理解。由于同时采用多台摄像机的每幅图上椭圆边界的每个点，所获得的原始信息量大，因此该方法具有较好的抗噪声性能，可以得到稳定可靠的结果，其测量精度明显高于目前使用的其它方法。该方法另一优点是各摄像机图像上的椭圆图像不要求是完整的和对应的，可以是部分椭圆，这就增加了方法的实用性。

参考文献

- [1] 王之卓. 摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1982.
- [2] 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.
- [3] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [4] 章志鸣, 沈元华, 陈惠芬. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [5] T Luhmann, S Robson, S Kyle and I Hartley. Close Range Photogrammetry, Principles, techniques and applications[M]. Caithness, UK: Whittles Publishing, 2006.
- [6] Fryer J. G. Close Range Photogrammetry and Machine Vision[M]. Caithness, UK: Whittles Publishing, 1996.
- [7] Andresen K, Kamp B, Ritter R. 3D-Contour of Crack Tips Using a Grating Method[C]. 2nd Int Conf on Photomechanics and Speckle Metrology. SPIE. 1991, 1554A : 93 ~ 100.
- [8] Sirkis J S, Lim T J. Displacement and strain measurement with automated grid methods[J]. Experimental Mechanics, 1990(31): 382-388.
- [9] Parks V J. Strain Measurement Using Grid[J]. Optical Engineering, 1982, 21(4) : 633-639.
- [10] 权铁汉, 陆宏伟, 于起峰. 网格法及其在大变形测量中的应用[J]. 实验力学, 2000, 15(1) : 83-91.
- [11] Q. Yu, X. Ding and Z. Lei. Optical measurement system for bridge displacement and vibration[C]. The 3rd Int. Conf. On Experimental Mechanics, SPIE, 2001.
- [12] 李德仁等. 基础摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1995
- [13] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
- [14] S. Granshaw. Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry[J]. Photogrammetric Record,

1980, 10(56): 181~207

[15] T. Bill, M. Philip, H. Richard, F. Andrew. Bundle Adjustment - A Modern Synthesis[J]. In W. Triggs, A. Zisserman, and R. Szeliski, editors, Vision Algorithms: Theory and Practice, LNCS, Springer Verlag, 2000: 298~375

[16] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003

[17] 李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002

[18] Richard Hartley, Andrew Zisserman 著, 韦穗, 杨尚骏, 章权兵, 胡茂林译. 计算机视觉中的多视图几何[M]. 安徽大学出版社, 2002

[19] C.P.Lu, G. D.Hager, E.Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.

[20] A. Ansar, K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 578-589.

[21] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测法测量空间目标三维姿态[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2) : 15-19.

[22] Finsterwalder R. Zur verwendung von pablinien bei photogrammetrischen aufgaben[J]. Z.Vermessungswes, 1991(2): 60-66.

[23] Andresen K, Yu Q F. Calculation of the geometric parameters of an ellipse if space by its eds in the images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry, 1994,49(2) : 33-37.

[24] Andresen K. Ermittlung von raumelementen aus kanten im bild[J]. Z.Vermessungswes, 1991(59) : 212-220.

[25] Andresen K, Hensch R. Calculation of analytical elements in space using a contour algorithm[C] . Int. Arch.Photogramm. resp.SPIE, 1395, Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1990, 28(5/2) : 863-869.

第三章 摄像测量系统标定

普通图像处理分析过程只需图像本身,不需要涉及摄像机的内外系统参数。而在摄像测量中,为了从图像中定量提取、测量空间物体的几何信息和运动信息,必须建立图像中像点位置和空间物体点位置的相互对应关系,而这种对应关系由摄像系统成像模型及摄像机参数决定,因此摄像测量在处理图像信息的同时,还需要摄像机的内外系统参数。但是由于摄像机的光心、光轴和焦距等并不是物理上的实体,是看不见摸不着的,它们更多地是数学分析模型的参数。因此在实施测量之前,通常需要通过实验和计算来确定摄像测量系统的参数,这就是摄像测量系统标定。

摄像系统标定是摄像测量的最基本、最重要工作之一,也是相对复杂、困难的工作,是摄像测量区别于其它图像处理、分析技术的特色理论和技术。它已有许多成熟的方法和算法,但同时一直是摄像测量和光学测量研究领域的热点之一。对于不同的条件和应用对象,摄像机标定仍在不断地发展新的方法和算法。由于对多数摄像测量来说,物距是焦距的几十倍甚至成千上万倍,因此摄像系统的内外系统参数的微小误差在测量结果中可能被放大成千上万倍。所以要高精度测量,必须要对摄像系统进行高精度的标定。

3.1 像机标定方法概述

摄像测量中像机标定的任务是通过实验和计算确定像机参数,包括内参数、外参数和像差系数。在摄影测量学中,相机标定也称为相机检定^[1]。

摄影测量和光学测量中,一般通过经纬仪、准直光管、标定试验场等专用设备和场所进行摄像机标定^[1]。在计算机视觉中研究的多是用像机采集标定参照物的图像,再通过分析图像来求解像机参数^[2]。

摄影测量和计算机视觉自其产生就提出了像机标定的需求,研究者们提出了多种多样的像机标定方法。这些方法大致可分为三类:传统标定方法、基于主动视觉的标定方法和自标定方法^[3]。传统标定方法通过精确给出空间位置坐标的控制点或控制线等已知结构的参照物,基于场景信息进行标定。基于主动视觉的标定方法需要控制像机做某些特殊运动,利用像机运动信息进行标定。自标定方法通过非控制点或非控制线等未知结构参照物进行标定,像机需要从多个方位采集标定参照物的图像。也有很多研究者将基于主动视觉的标定方法归入自标定一类^[2,3]。

3.1.1 传统像机标定方法

传统像机标定方法大致可分为以下几类^[1~3]。

1) 直接非线性优化法

控制点的三维坐标与其对应的二维图像点之间的关系是非线性的,可以基于某些代价函数最小化直接搜索像机参数。摄影测量学中的大部分标定算法属于此类^[1,4,5]。这类算法的优点是可以覆盖各种类型的像差,而且获得的参数精度非常高。但这类算法计算代价较高。由于采用完全非线性迭代算法,如果所给初始值精度不够高,则可能导致算法收敛到错误的解。而且由于参数个数太多,算法稳定性差,甚至导致算法失败。

2) 直接线性变换解法

直接线性变换解法(Direct Linear Transformation, DLT)由 Abdel 和 Karara 提出^[6]。最早的 DLT 方法只考虑线性成像模型,不考虑像差,采用线性解法得到一组中间参数,然后从中间参数分解得到最终参数。通过线性变换直接求解,简单快速,但未对镜头像差进行修正,而且未考虑参数间存在的约束关系,因而精度较差。为了对非线性畸变进行修正,Wong 和 Karara 提出了在线性求解的基础上再进行非线性优化,以提高标定精度^[7,8]。虽然这已不完全是线性求解,但仍称其为 DLT 方法。

3) 两步法

这类算法对大部分标定参数采用线性求解,其余少部分参数用非线性优化或迭代方法求解。“两步法”标定中,以 Tsai 的标定方法和 Weng 的改进标定方法最为典型。Tsai 在 1987 年 SPIE 会议上发表了他的摄像系统万能标定方法^[9],并被大会评为杰出论文。该标定方法首先线性求得外参数和焦距,然后迭代求解像差系数。由于具有精度较高、方法简单和应用方便等优点, Tsai 的标定方法很快在摄像测量领域中推广使用。但是 Tsai's 标定法中仅考虑了镜头的轴对称像差,在像差模型上显得有些粗糙。Weng 针对这个不足,提出了包括非轴对称像差的更为全面的像差修正模型^[10],模型求解和标定的步骤与 Tsai 的方法相似,在求解线性参数与求解像差系数之间进行迭代优化。

两步法由于大部分参数可线性得到,需要迭代求解的参数个数很少,因此对初始值的要求不像直接非线性优化法那么严格,可以用 DLT 法的结果作为初值,算法稳定。同时两步法考虑了像差,可得到高精度的结果。因而在实际应用中,较普遍的使用两步法进行像机标定。

3.1.2 像机自标定方法和基于主动视觉的标定方法

除了需要提供一个尺度信息外（如某任意两个参考点间的绝对距离），像机自标定不需要已知参照物和其它的空间三维信息或摄像机参数信息，仅利用多次成像之间的约束关系计算像机参数。而如果没有尺度信息，则在相差一个尺度因子的意义下得到标定结果，即对于焦距、平移向量、目标结构尺寸等参数，只能得到各参数之间的比例关系，而无法确定其具体数值。自标定不需要初值，因而不同于在已知初值的基础上通过光束法平差等优化算法计算像机和目标参数精确值的方法。光束法平差等优化算法有时需要通过自标定提供初值。

像机自标定是计算机视觉界研究的热点和前沿。Faugeras等首先提出像机自标定的思想，并引入了描述多次成像之间约束关系的Kruppa方程，使得在场景未知和像机做任意运动的一般情形下的标定成为可能^[11~13]。鉴于直接求解Kruppa方程的困难，许多研究者又提出了分层逐步标定的思想，即首先对图像序列做射影重建，在此基础上再进行仿射标定和欧氏标定。分层逐步标定的方法以QR分解法、绝对二次曲面法、模约束法等为代表^[14~16]。Heyden、Pollefeys等进一步提出了拍摄过程中像机内参数变化条件下的像机自标定，并给出了一种比较实用的可变内参数条件下基于优化的像机自标定方法^[17,18]。自标定与三维结构重建联系紧密，我们将在第七章结合从序列图像重建目标三维结构介绍自标定的基本原理。

基于主动视觉的标定方法需要控制像机做某些可控的运动，如绕光心旋转或纯平移等，利用这种运动的特殊性可以计算出像机参数^[19~21]。在机器人手眼定标、头眼定标中，像机运动可以控制，因而较多地用到基于主动视觉的标定方法^[2,21]。

3.2 基于控制点进行像机标定

基于空间坐标精确已知的控制点标定像机的方法和算法是经典的、常用的像机标定方法。这类标定方法需要构造若干控制点，然后用待标定像机采集这些控制点的图像并提取各控制点的像点，再根据控制点的空间坐标和对应像点的图像坐标计算像机的参数^[1,2,22]。

在广泛应用的基于控制点“两步法”标定中，一般先标定像机线性参数，再标定像差系数，这两步之间进行多次迭代。本书作者提出了先修正非线性畸变，再分别标定线性参数和像差系数的“三步法”，基本不需要迭代，提高了标定计算效率。下面分别进行介绍。

3.2.1 投影矩阵的线性求解和分解

(1) 从6个以上异面控制点成像线性求解投影矩阵

对用投影矩阵的元素表达的成像共线方程式(2.1.19)进行移项，可以得到关于投影矩阵元素 $m_0 \sim m_{11}$ 的线性齐次方程组

$$\begin{cases} X_i m_0 + Y_i m_1 + Z_i m_2 + m_3 - \tilde{x}_i X_i m_8 - \tilde{x}_i Y_i m_9 - \tilde{x}_i Z_i m_{10} - \tilde{x}_i m_{11} = 0 \\ X_i m_4 + Y_i m_5 + Z_i m_6 + m_7 - \tilde{y}_i X_i m_8 - \tilde{y}_i Y_i m_9 - \tilde{y}_i Z_i m_{10} - \tilde{y}_i m_{11} = 0 \end{cases} \quad (3.2.1)$$

根据式(2.1.18)表示的投影矩阵各元素的构成形式，有 $m_{11} = T_Z$ ，它是世界坐标系原点在像机坐标系中的 Z 坐标。只要世界坐标系的原点不取在像机坐标系的 XY 平面内，就有 $T_Z \neq 0$ 。通常摄像测量的对象都在像机镜头的前方，因而世界坐标系也建立在像机镜头的前方，故 $T_Z > 0$ ，即 $m_{11} > 0$ 。

用 m_{11} 除投影矩阵各元素。令 $s_i = m_i / m_{11}$ ， $i = 0, 1, \dots, 10$ ，则从式(3.2.1)得到关于 $s_0 \sim s_{10}$ 的线性方程组

$$\begin{cases} X_i s_0 + Y_i s_1 + Z_i s_2 + s_3 - \tilde{x}_i X_i s_8 - \tilde{x}_i Y_i s_9 - \tilde{x}_i Z_i s_{10} = \tilde{x}_i \\ X_i s_4 + Y_i s_5 + Z_i s_6 + s_7 - \tilde{y}_i X_i s_8 - \tilde{y}_i Y_i s_9 - \tilde{y}_i Z_i s_{10} = \tilde{y}_i \end{cases} \quad (3.2.2)$$

式(3.2.2)中未知数有 11 个，而对每个空间控制点 (X, Y, Z) 可以列出两个方程，当有 6 个以上不共面的控制点时，就可求解线性方程组得到 $s_0 \sim s_{10}$ 。而如果这些控制点共面，会使线性方程组(3.2.2)系数矩阵中 (s_0, s_1, s_2) 、 (s_4, s_5, s_6) 和 (s_8, s_9, s_{10}) 三组系数列向量分别线性相关，从而使方程组的系数矩阵奇异。

由于旋转矩阵 R 为单位正交阵，故而 $r_6^2 + r_7^2 + r_8^2 = 1$ 。根据投影矩阵各元素的构成式(2.1.18)， m_8 、 m_9 、 m_{10} 分别对应 r_6 、 r_7 、 r_8 ，因而 $m_8^2 + m_9^2 + m_{10}^2 = 1$ 。则

$$s_8^2 + s_9^2 + s_{10}^2 = \frac{m_8^2 + m_9^2 + m_{10}^2}{m_{11}^2} = \frac{1}{m_{11}^2} \quad (3.2.3)$$

由于 $T_Z = m_{11} > 0$ ，可得到

$$T_Z = m_{11} = \sqrt{\frac{1}{s_8^2 + s_9^2 + s_{10}^2}} \quad (3.2.4)$$

进而可以得到投影矩阵的其它元素， $m_i = s_i m_{11}$ ， $i = 0, 1, \dots, 10$ 。

(2) 从投影矩阵分解像机线性参数

根据投影矩阵的元素 m_8 、 m_9 、 m_{10} 的形式可以直接得到

$$r_6 = m_8, \quad r_7 = m_9, \quad r_8 = m_{10} \quad (3.2.5)$$

将旋转矩阵 R 的各行向量记为 \bar{r}_0 , \bar{r}_1 和 \bar{r}_2 , 根据 R 的单位正交性有

$$\bar{r}_0 \cdot \bar{r}_2 = \bar{r}_1 \cdot \bar{r}_2 = 0, \quad \bar{r}_2 \cdot \bar{r}_2 = 1, \quad |\bar{r}_0 \times \bar{r}_2| = |\bar{r}_1 \times \bar{r}_2| = 1, \quad |\bar{r}_2 \times \bar{r}_2| = 0 \quad (3.2.6)$$

将投影矩阵 M 的左边三列构成的 3×3 方阵的各行向量记为 \bar{m}_0 , \bar{m}_1 和 \bar{m}_2 , 则有

$$\begin{cases} \bar{m}_0 \cdot \bar{m}_2 = F_x \bar{r}_0 \cdot \bar{r}_2 + C_x \bar{r}_2 \cdot \bar{r}_2 = C_x \\ \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_2 = F_y \bar{r}_1 \cdot \bar{r}_2 + C_y \bar{r}_2 \cdot \bar{r}_2 = C_y \\ |\bar{m}_0 \times \bar{m}_2| = F_x |\bar{r}_0 \times \bar{r}_2| + C_x |\bar{r}_2 \times \bar{r}_2| = F_x \\ |\bar{m}_1 \times \bar{m}_2| = F_y |\bar{r}_1 \times \bar{r}_2| + C_y |\bar{r}_2 \times \bar{r}_2| = F_y \end{cases} \quad (3.2.7)$$

这就得到了主点和等效焦距。再根据式(2.1.18)可以得到

$$\begin{aligned} r_0 &= (m_0 - C_x r_6) / F_x, & r_1 &= (m_1 - C_x r_7) / F_x, & r_2 &= (m_2 - C_x r_8) / F_x \\ r_3 &= (m_4 - C_y r_6) / F_y, & r_4 &= (m_4 - C_y r_7) / F_y, & r_5 &= (m_5 - C_y r_8) / F_y \\ T_x &= (m_3 - C_x T_z) / F_x, & T_y &= (m_7 - C_y T_z) / F_y \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

进一步可以根据旋转矩阵 R 的组成形式分解出三个旋转角。例如 R 的组成形式为式(2.1.7), 则可按下式分解旋转角:

$$A_y = \arctan\left(\frac{-r_6}{r_8}\right), \quad A_z = \arctan\left(\frac{r_1}{r_4}\right), \quad A_x = \arctan\left(\frac{-r_7}{r_1 \sin A_z + r_4 \cos A_z}\right) \quad (3.2.9)$$

3.2.2 从共面控制点平面靶标多次成像标定像机线性参数

制备异面控制点对工程实施的要求较高。而使用共面控制点时, 由于会使所构成的线性方程组奇异, 无法按 3.2.1 节的过程求解投影矩阵。但由于共面点成像关系的表达形式能够得到一定的简化, 从共面控制点的单幅图像能够线性求解像机的外参数和部分内参数^[23]。如果从不同方位拍摄共面控制点平面靶标的多幅图像, 就能够标定全部像机参数^[9,10,24]。

这里需要注意的是, 如果能够控制共面控制点平面靶标做运动参数精确已知的运动, 如沿垂直平面靶标的方向平移一段已知距离, 就可以通过坐标变换得到运动前后各个控制点在同一坐标系下的空间坐标, 也就相当于提供了若干异面控制点。在运动前后拍摄控制点图像并在图像上提取各控制点, 就可以按照 3.2.1 节的方法进行标定。但这种做法实际上并没有利用控制点间的共面关系。

下面介绍的标定方法要求像机在两个或两个以上不同方位拍摄共面控制点平面靶标,

像机和靶标都可以自由地移动，不需要知道运动参数。在标定过程中，像机的内参数保持不变^[24]。

(1) 共面控制点成像映射矩阵的计算

为了简化共面点成像关系的表达 将共面控制点所在平面作为世界坐标系的 XY 平面。根据 2.1.4 节的介绍，这时的成像关系可以用映射矩阵 H 表示为式(2.1.24)。一般通过极大似然估计计算映射矩阵 H 。由于像差、图像噪声、像点提取误差等的存在，实际图像点 (x, y) 并不严格满足式(2.1.24)。因此，极大似然估计过程就是使根据 H 的估计值对控制点重投影得到的像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 与实际像点 (x, y) 之间的残差最小化的过程，即目标函数为

$$\min \sum_i \left[(x_i - \tilde{x}_i)^2 + (y_i - \tilde{y}_i)^2 \right] \quad (3.2.10)$$

(2) 像机线性参数的求解

记组成映射矩阵的各列向量为 \mathbf{h}_1 、 \mathbf{h}_2 、 \mathbf{h}_3 ，组成 R 的各列向量为 \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 、 \mathbf{r}_3 。则根据映射矩阵的表达式(2.1.25)，有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_2 & \mathbf{h}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x \\ 0 & F_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & T \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} K \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & T \end{bmatrix} \quad (3.2.11)$$

其中 K 为像机的内参数矩阵， T 为平移向量， Z_c 为比例系数。 H 已经通过最大似然估计求解。根据旋转矩阵 R 的正交性，有

$$\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2 = 0, \quad \mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2^T \mathbf{r}_2 = 1 \quad (3.2.12)$$

根据式(3.2.11)，有

$$\mathbf{r}_1 = Z_c K^{-1} \mathbf{h}_1, \quad \mathbf{r}_2 = Z_c K^{-1} \mathbf{h}_2, \quad T = Z_c K^{-1} \mathbf{h}_3 \quad (3.2.13)$$

代入式(3.2.12)得到关于像机内参数矩阵 K 的两个基本约束

$$\begin{cases} \mathbf{h}_1^T K^{-T} K^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \\ \mathbf{h}_1^T K^{-T} K^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T K^{-T} K^{-1} \mathbf{h}_2 \end{cases} \quad (3.2.14)$$

令

$$B = K^{-T} K^{-1} = \begin{bmatrix} B_0 & B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 & B_5 \\ B_6 & B_7 & B_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{F_x^2} & 0 & \frac{-C_x}{F_x^2} \\ 0 & \frac{1}{F_y^2} & \frac{-C_y}{F_y^2} \\ \frac{-C_x}{F_x^2} & \frac{-C_y}{F_y^2} & \frac{C_x^2}{F_x^2} + \frac{C_y^2}{F_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.15)$$

B 是对称矩阵，将其表示为一个六维向量

$$\mathbf{b} = [B_0 \quad B_1 \quad B_4 \quad B_2 \quad B_5 \quad B_8]^T \quad (3.2.16)$$

其中 $B_1 = 0$ ，则式(3.2.14)可化为关于 B_i ($i=0,2,4,5,8$) 的齐次线性方程组。代入从 n 个方位拍摄图像得到的 n 组映射矩阵，得到 $2n$ 个关于 B_i 的齐次线性方程组。如果 $n \geq 2$ ，就可以在相差一个尺度因子的意义下确定 \mathbf{b} 。利用 Cholesky 矩阵分解得到 K ，从而确定了像机各内参数。

根据旋转矩阵的单位正交性有 $\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_2\| = 1$ ，将(3.2.13)代入该式得到

$$Z_c = 1/\|K^{-1}\mathbf{h}_1\| = 1/\|K^{-1}\mathbf{h}_2\| \quad (3.2.17)$$

将这一结果回代入式(3.2.13)，得到 \mathbf{r}_1 ， \mathbf{r}_2 和 T 。同样根据旋转矩阵的单位正交性，有

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \quad (3.2.18)$$

至此，即得到了像机的全部内参数和外参数。

3.2.3 像差系数的计算和两步法标定流程

(1) 基于控制点成像求解像差系数

根据式(2.1.31)，各控制点成像的像差是实际像点和理想像点间的偏差

$$\delta_{x_i} = x_i - \tilde{x}_i, \quad \delta_{y_i} = y_i - \tilde{y}_i \quad (3.2.19)$$

实际标定像机的过程中，理想像点 $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 通过将线性参数标定结果和控制点空间坐标代入中心投影成像模型对控制点进行重投影得到。像差模型的形式有很多种，以式(2.1.32)的像差模型为例，通过移项，可以得到关于像差系数 $k_0 \sim k_4$ 的线性方程组：

$$\begin{cases} x_{d_i} (x_{d_i}^2 + y_{d_i}^2) k_0 + (x_{d_i}^2 + y_{d_i}^2) k_1 + x_{d_i}^2 k_3 + x_{d_i} y_{d_i} k_4 = \delta_{x_i} \\ y_{d_i} (x_{d_i}^2 + y_{d_i}^2) k_0 + (x_{d_i}^2 + y_{d_i}^2) k_2 + x_{d_i} y_{d_i} k_3 + y_{d_i}^2 k_4 = \delta_{y_i} \end{cases} \quad (3.2.20)$$

其中 x_d, y_d 为如式(2.1.33)的规一化图像坐标。多点联立求解该线性方程组就可以得到各像差系数。

(2) 两步法像机标定的求解流程

两步法将像机线性参数和像差系数的计算进行迭代求解，其流程是：

第一步，不考虑像差，将实际像点视同理想像点，计算像机线性参数。如果镜头畸变比较严重，也可只选用图像中心区域的点进行求解。因为像差的分布规律是图像中心处像差较小，图像边缘处像差较大，因而图像中心区域的像点更接近其理想像点的位置。

第二步，根据第一步得到的像机线性参数计算各控制点的重投影点，作为理想像点，再计算像差系数。

根据得到的像差系数修正图像点的像差作为下一步迭代的理想像点，通过反复迭代，直到结果稳定。因为迭代过程在不断地修正像点，所以在迭代完成后，还需要用最后得到的理想像点和实际成像的像点计算一次像差系数，作为像差系数的最后标定结果。

上述两步法标定的求解流程示意如图 3.2.1。

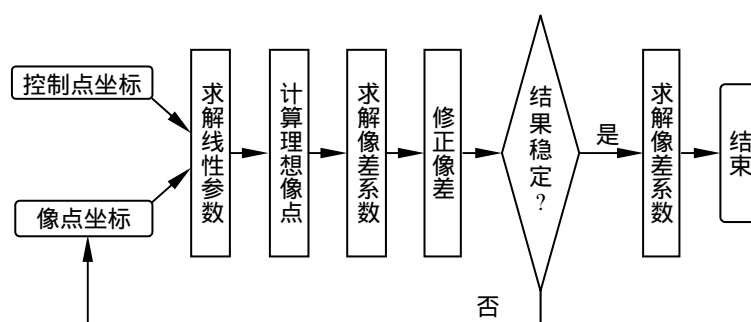


图 3.2.1 基于异面控制点两步法标定像机求解流程

3.2.4 像机标定的三步法

上述的两步法标定中，先不考虑像差来标定线性参数，再将得到的线性参数固定来标定像差系数。在这两步之后，需要通过极大似然估计或多次迭代等方式对标定参数进行优化，以达到所需的精度。本书作者提出了采用平面网格板作为标定参照物，先进行图像畸变修正，再依次标定线性参数和像差系数的三步法^[25]，既能够得到高精度标定结果，又可以大大减少迭代次数，具有很好的实用性。

标定用正交网格板各网格节点在世界坐标系中的坐标已知。如图 3.2.2(a)用像机在两个或两个以上方位拍摄网格板图像后，进行如下三步法的标定求解。

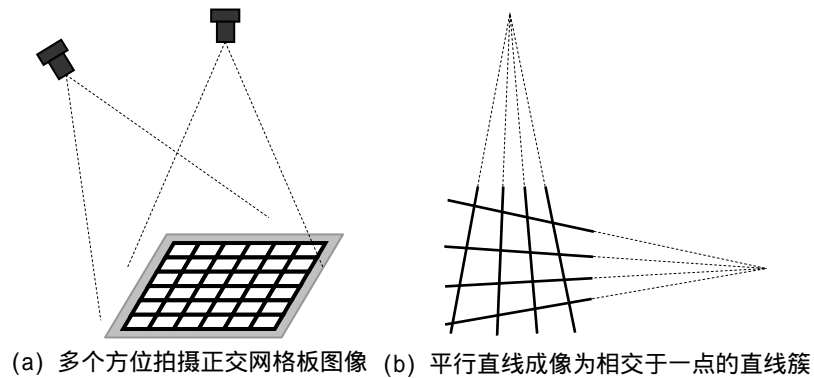


图 3.2.2 多个方位拍摄正交网格板图像进行三步法标定

第一步，提取正交网格图像中各网格节点坐标，用图像中部区域的网格节点进行网格场拟合，得到无畸变的理想网格图像及相应网格节点的坐标。

第二步，根据上一步拟合得到的无畸变网格场的网格节点坐标，求解像机的线性参数：主点、等效焦距、平移向量和旋转矩阵。

第三步，利用第一步拟合得到的无畸变网格节点坐标与实际图像网格节点坐标比较，依据两者之间的偏差，标定像差系数。

第一步的目的是将像差的影响从网格图像中抽离掉。根据透视几何原理，如果摄像系统是无像差的针孔模型，它对平面正交网格成像时，原来两组正交平行线段将成像为两簇相交于一点的直线，如图 3.2.2(b)。当像机光轴与正交网格平面垂直时，两组平行线仍保持平行，即相交于无穷远点。由于镜头像差和噪声等影响，使得图像中的网格线并不严格满足该透视关系。由于镜头畸变以中心对称的径向畸变为主，并且图像中部区域(如占全场 $1/2 \sim 2/3$ 区域)畸变很小，因而取该区域的网格节点坐标，用最小二乘法拟合出理想的两簇共点直线，这两簇直线的各相交点就可以认为是无畸变的理想网格场，达到了分离像差影响的目的。

第二步利用无畸变的网格场图像，就可以求解没有耦合像差影响的像机线性参数。第三步利用无畸变的网格场与实际图像网格场比较，就可以求解没有耦合线性参数影响的像差系数。而在直接利用原图像进行线性参数求解的两步法中，求解线性参数时是耦合了像差的影响的，求解像差时也耦合了线性参数的影响，故而需要进行多次迭代。

本三步法标定中，像机线性参数和像差系数的求解可以借用两步法等标定方法中的相应算法。为了进一步提高精度，也可以将此三步法求解过程重复一遍。

3.3 基于控制直线的像机标定方法

摄像测量中，基于点特征进行标定、测量等是应用最多的。而非点特征，如直线、二次曲线等特征也是场景中普遍存在的。各种基于直线或二次曲线特征的方法算法也是摄像测量研究的热点^[26~28]。在基于直线特征进行像机标定方面，基于空间直线的成像关系，发展了很多与基于空间点的标定方法相类似的算法。例如从不共面空间控制直线线性标定像机线性参数，从共面控制直线的多次成像标定线性参数等^[2]。

本节介绍作者提出的从共面控制直线单幅图像标定像机部分线性参数的方法和从直线成像标定像差系数的方法^[29~31]。与基于控制点标定像机的两步法类似，基于控制直线也可以进行计算线性参数与计算像差系数迭代的两步法标定。

3.3.1 从共面控制直线单幅图像标定像机部分线性参数

使用共面控制直线单幅图像进行标定时，由于会使所构成的线性方程组奇异，无法完整地线性求解投影矩阵和分解出全部线性参数。但可以根据共面直线成像关系求解出投影矩阵的部分元素，并从中分解出部分像机参数。下面的标定方法能够从共面控制直线单幅图像计算得到除主点以外的像机线性参数。

(1) 共面直线的中心透视投影成像关系

与研究共面点成像关系类似，为了简化推导过程，将共面直线所在平面作为世界坐标系的 XY 平面，即对于这些控制直线， $Z = 0$ 。当控制直线及其像直线处于与坐标轴平行等特殊位置时，直线方程可以更简化地表达，以下不考虑这种情况。设处于 XY 平面内的控制直线方程为

$$Y = AX + B \quad (3.3.1)$$

其中心透视投影的像直线为

$$\tilde{y} = a\tilde{x} + b \quad (3.3.2)$$

即描述该平面直线的参数是 A 和 B ，描述对应的像直线的参数是 a 和 b 。将式(3.3.1)和式(3.3.1)代入用投影矩阵元素表达的共面点的成像共线方程式(2.1.19)，得到

$$\begin{cases} \tilde{x} = \frac{m_0 X + m_1 (AX + B) + m_3}{m_8 X + m_9 (AX + B) + m_{11}} \\ a\tilde{x} + b = \frac{m_4 X + m_5 (AX + B) + m_7}{m_8 X + m_9 (AX + B) + m_{11}} \end{cases} \quad (3.3.3)$$

再将式(3.3.9)的第一式代入第二式并整理，得到

$$(am_0 + aAm_1 - m_4 - Am_5 + bm_8 + bAm_9)X + (aBm_1 + am_3 - m_5B - m_7 + bBm_9 + bm_{11}) = 0 \quad (3.3.4)$$

使式(3.3.4)对该平面直线上所有点都成立的条件是它的两个系数都为0，即

$$\begin{cases} am_0 + aAm_1 - m_4 - Am_5 + bm_8 + bAm_9 = 0 \\ aBm_1 + am_3 - Bm_5 - m_7 + bBm_9 + bm_{11} = 0 \end{cases} \quad (3.3.5)$$

这是关于 m_i ($i=0,1,3,4,5,7,8,9,11$)的齐次线性方程组。该式经变形可改写为

$$\begin{cases} a = \frac{(m_4 + Am_5)(Bm_9 + m_{11}) - (m_5B + m_7)(m_8 + Am_9)}{(m_0 + Am_1)(Bm_9 + m_{11}) - (Bm_1 + m_3)(m_8 + Am_9)} \\ b = \frac{(m_4 + Am_5)(Bm_1 + m_3) - (m_5B + m_7)(m_0 + Am_1)}{(m_8 + Am_9)(Bm_1 + m_3) - (Bm_9 + m_{11})(m_0 + Am_1)} \end{cases} \quad (3.3.6)$$

这就是中心透视投影下空间共面直线的成像关系。

(2) 从共面直线单幅图像标定像机外参数和等效焦距

设面控制直线及其像直线的方程分别为式(3.3.1)和(3.3.2)。对于控制直线，直线方程中的参数 A 、 B 为已知，像直线方程中的参数 a 和 b 通过在图像上提取直线得到。将控制直线及其像直线的参数代入式(3.3.5)，即得到关于投影矩阵 M 部分元素 m_i ($i=0,1,3,4,5,7,8,9,11$)的线性方程组。

根据 $m_{11}=T_Z>0$ ，可以用 m_{11} 除投影矩阵各元素。令 $s_i=m_i/m_{11}$ ($i=0,1,3,4,5,7,8,9$)，则式(3.3.5)成为关于 s_i 的线性方程组

$$\begin{cases} as_0 + aAs_1 - s_4 - As_5 + bs_8 + bAs_9 = 0 \\ aBs_1 + a_s s_3 - Bs_5 - s_7 + bBs_9 = -b \end{cases} \quad (3.3.7)$$

其中共有8个未知数。每条控制直线可以提供两个方程，当有4条以上共面控制直线时，就可求解该线性方程组，得到 s_{i_0} 。

根据投影矩阵各元素的表达式(2.1.18)， s_i ($i=0,1,3,4,5,7,8,9$)的表达式为

$$\begin{aligned} s_0 &= (F_x r_0 + C_x r_6) / T_Z, & s_1 &= (F_x r_1 + C_x r_7) / T_Z, & s_3 &= (F_x T_x + C_x T_z) / T_Z \\ s_4 &= (F_y r_3 + C_y r_6) / T_Z, & s_5 &= (F_y r_4 + C_y r_7) / T_Z, & s_7 &= (F_y T_y + C_y T_z) / T_Z \\ s_8 &= r_6 / T_Z, & s_9 &= r_7 / T_Z \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

对式(3.3.8)中的 s_i 进行线性组合，可以得到

$$\begin{aligned} s_0 - C_x s_8 &= F_x r_0 / T_Z, & s_1 - C_x s_9 &= F_x r_1 / T_Z \\ s_4 - C_y s_8 &= F_y r_3 / T_Z, & s_5 - C_y s_9 &= F_y r_4 / T_Z \end{aligned} \quad (3.3.9)$$

根据式(3.3.8)和(3.3.9)可以将旋转矩阵 R 的前两列元素表达为

$$\begin{aligned}
r_0 &= (s_0 - C_x s_8) T_Z / F_x, & r_1 &= (s_1 - C_x s_9) T_Z / F_x \\
r_3 &= (s_4 - C_y s_8) T_Z / F_y, & r_4 &= (s_5 - C_y s_9) T_Z / F_y \\
r_6 &= s_8 T_Z, & r_7 &= s_9 T_Z
\end{aligned} \tag{3.3.10}$$

从而，根据 R 的单位正交性可以得到

$$\begin{cases}
\frac{(s_0 - C_x s_8)^2}{F_x^2} + \frac{(s_4 - C_y s_8)^2}{F_y^2} + s_8^2 = \frac{1}{T_Z^2} \\
\frac{(s_1 - C_x s_9)^2}{F_x^2} + \frac{(s_5 - C_y s_9)^2}{F_y^2} + s_9^2 = \frac{1}{T_Z^2} \\
\frac{(s_0 - C_x s_8)(s_1 - C_x s_9)}{F_x^2} + \frac{(s_4 - C_y s_8)(s_5 - C_y s_9)}{F_y^2} + s_8 s_9 = 0
\end{cases} \tag{3.3.11}$$

如果像机主点 (C_x, C_y) 已知（在有些应用中，可以将 (C_x, C_y) 近似取为图像中心），则式(3.3.11)是一个关于 $1/F_x^2$ 、 $1/F_y^2$ 和 $1/T_Z^2$ 的线性方程组。根据 T_Z 和等效焦距都大于零，可以唯一地确定 F_x 、 F_y 和 T_Z 。将 F_x 、 F_y 和 T_Z 的计算结果代入式(3.3.10)和(3.3.8)，就得到旋转矩阵的前两列元素和 T_x 、 T_y 。根据旋转矩阵的单位正交性，由式(3.2.17)计算旋转矩阵的第三列元素。至此，就完成了对除主点以外的像机线性参数的标定。

3.3.2 基于直线成像标定像差系数

由于非线性像差，点成像发生畸变后仍是点，而直线成像发生畸变后则不再是直线，如图 3.3.1。如果采用(2.1.32)的像差模型，则直线成像畸变后成为二次曲线，通过与理想的无畸变像直线比较，求解像差系数^[30]。

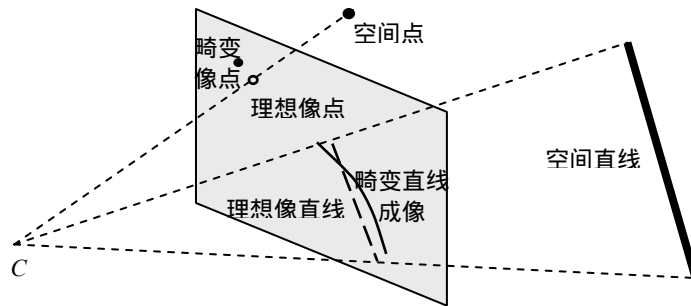


图 3.3.1 畸变的点成像和直线成像

(1) 非线性畸变后的直线成像

设理想成像直线为式(3.3.2)，畸变后直线成像曲线为

$$y = f(x) \tag{3.3.12}$$

根据理想像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 、像差 (δ_x, δ_y) 、有像差的实际像点 (x, y) 之间的关系式(2.1.32)，以及式(3.3.2)，式(3.3.12)化为

$$f(x) = y = \tilde{y} + \delta_y = a\tilde{x} + b + \delta_y = a(x - \delta_x) + b + \delta_y = ax + b - a\delta_x + \delta_y \quad (3.3.13)$$

将式(2.1.32)代入式(3.3.27)，可得直线成像畸变后的二次曲线方程：

$$f(x) = \rho_2 x^2 + \rho_1 x + \rho_0 \quad (3.3.14)$$

其中的系数 ρ_0, ρ_1, ρ_2 是内参数、像差系数以及理想成像直线参数 a 和 b 的函数。

(2) 像差系数的求解

式(2.1.32)的像差模型中，像差 (δ_x, δ_y) 是像差系数 $k_0 \sim k_4$ 的线性函数，因而根据式(3.3.13)得到的二次曲线的系数 ρ_0, ρ_1, ρ_2 也是像差系数的线性函数，因而得到关于像差系数 $k_0 \sim k_4$ 的线性方程组

$$\begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \mu_{25} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} & \mu_{34} & \mu_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_2 \\ \rho_1 - a \\ \rho_0 - b \end{bmatrix} \quad (3.3.15)$$

其中 ρ_0, ρ_1, ρ_2 的值通过大量提取成像畸变直线上的点并进行二次曲线拟合得到。在下面的两步法中，理想直线成像的参数 a 和 b 在第一次计算时通过对成像畸变直线上的点进行直线拟合得到；随后的迭代过程，根据直线中心透视投影成像关系，用每一步得到的像机线性参数对控制直线重投影得到 a 和 b 。系数 $\mu_{11} \sim \mu_{35}$ 是内参数、像差系数以及 a 和 b 的函数。

(3) 基于直线的射影不变性标定像差系数和部分内参数的方法

我们还提出了一种根据直线的射影不变性，即直线经中心透视投影成像后仍是直线的性质来标定像差系数和图像主点、像素纵横比的方法^[31]。该标定方法采用下面考虑径向畸变的像差模型：

$$\begin{cases} \delta_x = k(x - C_x)r^2 \\ \delta_y = \alpha k(y - C_y)r^2 \end{cases} \quad (3.3.16)$$

其中 k_d 为像差系数， α 为图像像素纵横比， $r^2 = (x - C_x)^2 + \alpha^2(y - C_y)^2$ 。

本算法以纠正像差后的直线成像点到理想成像直线的距离和最小以及成像点之间的斜率差最小为目标函数，将像差系数初值取为0、像素纵横比初值取为1、主点初值取在

图像中心，再通过非线性优化计算这些参数。

3.3.3 基于控制直线两步法标定像机参数

与基于控制点标定像机参数的两步法类似，基于控制直线标定像机参数两步法的步骤是：

第一步，不考虑像差，对直线所成像上的点进行直线拟合得到理想直线成像的参数，进而标定像机线性参数。

第二步，根据第一步得到的像机线性参数计算各控制直线的重投影直线，作为理想像直线；用直线所成像上的点拟合曲线得到实际畸变成像曲线的参数；根据理想像直线参数和实际成像曲线参数计算像差系数。

将求解线性参数和求解像差系数这两步进行迭代。即，根据得到的像差系数修正直线所成像上各点的像差，再重复上面的两步，直到结果稳定。因为迭代过程在不断地修正像点，所以在迭代完成后，还需要用最后得到的理想直线和实际直线的成像曲线计算一次像差系数，作为像差系数的最后标定结果。

3.4 基于光束法平差优化和约束条件的像机标定

由于标定参考标志能够高精度地给出绝对几何参数，前述的基于控制点、控制直线的标定方法容易得到较高精度的结果，并且求解参数较少，算法稳定。在控制点或控制直线易于制备和使用的条件下，通常采用这类方法。但在许多实际应用中，难于制备或使用结构参数已知的参考标志。本节介绍在无参考标志结构参数条件下，利用参考标志之间的一些约束关系，通过 2.4 节的光束法平差优化方法，高精度地得到像机参数，同时高精度得到参考标志的结构参数。这种方法适应性强、功能多、精度高，是使用广泛的专业标定方法。

3.4.1 平差优化标定像机参数的基本过程

基于光束法平差优化和约束条件，用点特征标定像机参数的基本过程是：

1) 制备或选取标定参考点并确定约束条件

标定参考点可以人工制备，或选取自然场景中的特征点。标定参考点在空间上应分布比较均匀，并尽量多地充满像机视场，以利于提高标定计算的稳定性和精度。

标定参考点分为两类：控制点和非控制点。其中大多数是非控制点，不需要给定其位置坐标。但如果仅用此非控制点进行光束法平差优化，只能在相差一个尺度因子的意义下得到标定结果。为了得到定量的标定结果，必须有包含高精度绝对尺度信息的约束条件，

如某两个参考点间的精确距离等。

图 3.4.1 是德国 AICON 公司用于本标定方法的一种标定架。标定架上设置了许多圆形标志，作为标定参考点，它们大多数没有精确位置。而标定架中几根较细黑杆及其上面的标志是精密加工的，黑杆上标志之间的距离精确已知，作为标定约束条件。

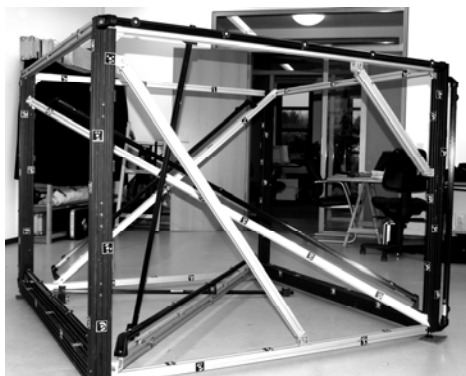


图 3.4.1 设置大量参考标志的标定架

2) 拍摄标定参考点图像

与基于控制点的标定不同，在平差优化标定过程中，各特征点的空间位置坐标也是需要求解的未知参数。为了建立足够的观测方程，需要像机在多个方位进行拍摄，得到标定参考点的图像序列，如图 3.4.2(a)。这些拍摄方位应该比较均匀分布，利于得到稳定的、高精度的标定结果。如果标定参考点分布在同一结构体上，也可以改变该结构体相对于像机的位置和姿态进行拍摄采图，如图 3.4.2(b)，等效于像机在多个方位进行拍摄。因为此标定是通过光束平差优化各参数，因而在拍摄标定参考点的图像序列时，并不要求每幅图像都包含所有标定参考点。

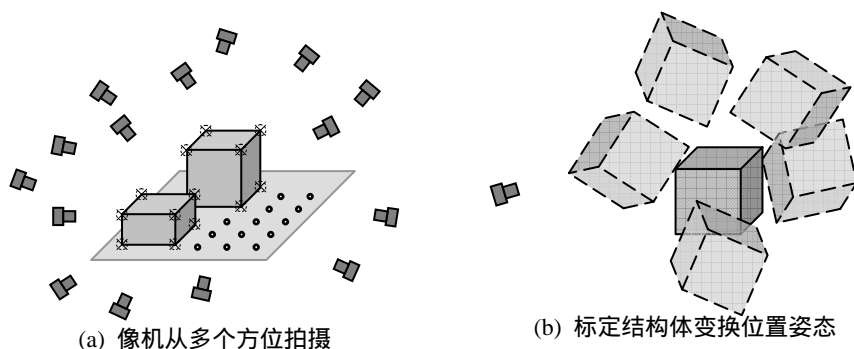


图 3.4.2 拍摄标定参考点图像序列的两种方式

3) 分析处理标定图像，进行平差计算

设标定参考点总数为 n ，各标定参考点在世界坐标系中的坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ，

$i = 0, 1, \dots, n-1$ 。标定过程中,待标定像机的内参数和像差系数保持不变,包括主点 (C_x, C_y) ,等效焦距 (F_x, F_y) 和像差系数 $(k_0, k_1, k_2, k_3, k_4)$ 。设像机在 m 个方位进行拍摄,每次拍摄时像机的平移向量和旋转角分别为 $T_j = (T_{x,j}, T_{y,j}, T_{z,j})$ 和 $(A_{x,j}, A_{y,j}, A_{z,j})$, $j = 0, 1, \dots, m-1$ 。这些就是需要标定求解的参数。

得到标定序列图像后,在各图像中提取标定参考点。然后需要确定各待求解参数的初值和根据约束条件列出条件方程。最后依据2.4节中光束法平差的求解流程对各个参数进行优化求解。关于平差参数初值的获取和约束条件方程的建立将在下面分别介绍。

3.4.2 平差标定初值的获取

基于序列图像进行像机自标定^[11,13,32]是对先验知识要求最少的获取像机参数和标定参考点初值的方法,它只需要在场景中提供一个已知尺度用以确定尺度因子,就能得到全部参数的初值。

自标定方法虽然比较灵活,但涉及较复杂的计算过程。实际应用中,特别是当全部或部分标定标志由人工制备时,通常能够根据制造参数或通过一般的规尺测量等方式给出这些标志的粗略位置坐标。在此基础上,可按下面的步骤得到各参数的初值。

- 1) 将所给出的标志的粗略位置坐标作为这些标志位置的初值。
- 2) 视这些有位置初值的标志为控制点,采用基于控制点标定像机线性参数的方法计算像机的主点、等效焦距和在各个拍摄方位的平移向量、旋转角,作为像机线性参数的初值。像差系数的初值通常取为0。更简单的做法是主点的初值取在图像中心,等效焦距的初值根据镜头的标称焦距和像机感光像元尺寸,按2.1节等效焦距的定义进行计算。
- 3) 根据像机内参数、像差系数和像机在各拍摄方位外参数的初值,对没有事先给出位置坐标初值的参考标志进行交会计算。至此,即得到了全部平差优化所需的参数初值。

3.4.3 约束条件方程的建立

通常根据能够事先高精度给出的某些标定参考点之间的结构关系,建立约束条件方程。常见的约束关系如:

某两个特征点 (X_0, Y_0, Z_0) 与 (X_1, Y_1, Z_1) 之间距离为 d ,相应的约束条件方程为

$$(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2 - d^2 = 0 \quad (3.4.1)$$

某三个特征点 (X_0, Y_0, Z_0) 、 (X_1, Y_1, Z_1) 和 (X_2, Y_2, Z_2) 共线,即约束关系为

$$\frac{X_2 - X_0}{X_1 - X_0} = \frac{Y_2 - Y_0}{Y_1 - Y_0} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_1 - Z_0} \quad (3.4.2)$$

则相应的约束条件方程为

$$\begin{cases} (X_2 - X_0)(Y_1 - Y_0) - (X_1 - X_0)(Y_2 - Y_0) = 0 \\ (Z_2 - Z_0)(Y_1 - Y_0) - (Z_1 - Z_0)(Y_2 - Y_0) = 0 \end{cases} \quad (3.4.3)$$

某四个特征点 (X_0, Y_0, Z_0) 、 (X_1, Y_1, Z_1) 、 (X_2, Y_2, Z_2) 和 (X_3, Y_3, Z_3) 共面，即约束关系为

$$\begin{vmatrix} X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ X_2 - X_0 & Y_2 - Y_0 & Z_2 - Z_0 \\ X_3 - X_0 & Y_3 - Y_0 & Z_3 - Z_0 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.4.4)$$

则相应的约束条件方程为

$$\begin{aligned} & (X_1 - X_0)(Y_2 - Y_0)(Z_3 - Z_0) + (X_3 - X_0)(Y_1 - Y_0)(Z_2 - Z_0) + (X_2 - X_0)(Y_3 - Y_0)(Z_1 - Z_0) \\ & - (X_3 - X_0)(Y_2 - Y_0)(Z_1 - Z_0) - (X_2 - X_0)(Y_1 - Y_0)(Z_3 - Z_0) - (X_1 - X_0)(Y_3 - Y_0)(Z_2 - Z_0) = 0 \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

其它还如某特征点在某空间直线、曲线、平面或曲面上，特征点到空间直线、曲线、平面或曲面的距离已知等约束关系，以及一些隐含着某些特征点坐标的空间相对几何关系等，可相应列出约束条件方程，此处不再列举。

3.5 二维图像畸变的标定与修正

对于二维摄像测量等情况，例如网格法测量物体应变、胶片图像数字化等应用，并不需要知道像机的光心位置和光轴方位等外部参数，只要获得图像的放大倍数和摄像头畸变参数等即可^[33~35]。例如对靶场电影经纬仪胶片图像进行数字化和判读，通常用 CCD 像机对胶片进行拍摄，得到其数字图像。理想的情况是此数字图像与原胶片图像之间只相差一个放大倍数。但在这一数字化过程中，难免存在镜头畸变和由于像机光轴与放置胶片的测量平面不垂直引起的透视剪切变形，因而需要对二维图像的畸变进行标定和修正，得到理想的数字图像，如图 3.5.1。

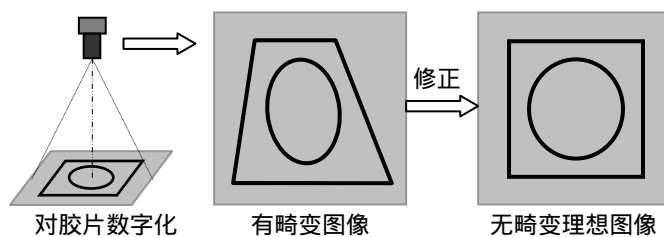


图 3.5.1 胶片图像数字化及畸变修正

3.5.1 图像畸变模型

综合考虑到各种镜头畸变像差和像机光轴与待测量物体表面不严格垂直引起的透视

变形，可用如下三次多项式来描述图像点 (x,y) 处的畸变

$$\begin{cases} \delta_x(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 \\ \delta_y(x,y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3 \end{cases} \quad (3.5.1)$$

需要注意的是，这里所说的图像畸变不仅包括镜头畸变引起的像差，还包括透视变形。即无畸变的理想图像是在没有像差，并且像机光轴与待测表面严格垂直的条件下得到的。

3.5.2 二维图像畸变标定步骤

用于二维图像畸变标定的常用标定参考物有黑（白）方块阵列和正交网格等，如图 3.5.2(a)所示。以图 3.5.2(b)所示的正交网格为例，以第 0 行、第 0 列节点为基准点，图像坐标为 (x_{00}, y_{00}) ，水平和垂直方向网格线间距分别为 Δx 和 Δy ，横向网格线与水平方向夹角为 α ，则第 i 列、第 j 行节点坐标可用下式描述：

$$\begin{cases} x = -ky + c_0 + i\Delta x \\ y = kx + d_0 + j\Delta y \end{cases} \quad (3.5.2)$$

其中 $k = \tan \alpha$ ， $d_0 = y_{00} - kx_{00}$ ， $c_0 = x_{00} + ky_{00}$ 。这样可由 $(k, c_0, d_0, \Delta x, \Delta y)$ 五个参数确定正交网格场。

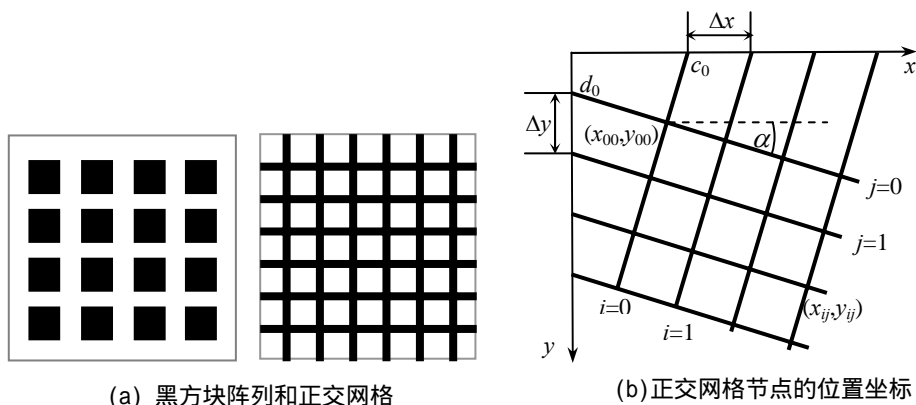


图 3.5.2 二维图像畸变标定参考物

图像标定的具体步骤如下：

1) 采集正交网格图

将高精度标准正交网格板放置在测量平面进行拍摄。制备网格板时除了要考虑成像放大倍数，还应使网格板尺寸与被测物体大致相当，并最好使网格图像充满整个成像区；图像网格线宽度应满足高精度亚像素定位提取的要求，同时又保证有足够多的网格节点。

2) 提取网格节点

高精度定位网格节点进行，确定节点的亚像素位置。当网格线宽度合适、成像比较清晰时，定位精度可以达到 0.01~0.02 个像素。关于亚像素定位技术将在第四章详细介绍。

3) 拟合理想网格场

由于实际成像时图像中部区域的像差很小，因此可用图像中部 1/2 或 1/3 区域内的网格节点来拟合产生理想网格场。将图像中部网格各节点的坐标 (x_{ij}, y_{ij}) 代入式(3.5.2)中，联立求解线性方程组，得到理想正交网格场参数 k 、 c_0 、 d_0 、 Δx 和 Δy ，从而得到无畸变理想网格场。

4) 求解畸变误差模型

将拟合得到的理想网格场各节点位置与实际图像提取的各网格节点位置相比较，得到各节点处对应的图像畸变 $(\delta_{xij}, \delta_{yij})$ 。将各理想网格节点坐标 (x_{ij}, y_{ij}) 和对应的图像畸变误差 $(\delta_{xij}, \delta_{yij})$ 代入式(3.5.1)，得到关于畸变系数 $a_0 \sim a_9$ 和 $b_0 \sim b_9$ 的线性方程组。求解该性方程组就得到图像畸变误差模型。

5) 修正图像畸变误差

利用得到的图像畸变误差模型，可以建立原图像和修正图像间的映射关系，从而得到修正畸变后的理想图像。畸变修正一般分为两步：坐标变换和灰度插值。坐标变换就是根据畸变误差模型计算理想图像各像素点 (x, y) 处的图像畸变误差，从而得到该点在原图像上对应点的坐标 (x', y') 。由于 (x', y') 通常不是整数，因此要用原图上 (x', y') 位置附近的像素灰度进行插值，得到 (x', y') 处的对应灰度值，再将该灰度值赋给理想图像的像素点 (x, y) ，得到修正畸变后的图像。如果要提取的目标为点目标，则可以直接针对原图上目标位置提取结果计算图像畸变误差和修正目标位置，可以避免大量插值计算。

3.5.3 图像畸变标定精度评价

标定得到图像畸变模型后，为了评价标定的精度，需要用该畸变模型对测量平面内的一幅已知特征参数的图像（实际中常仍然采用正交网格图像）进行修正，并比较修正后图像与理想无畸变图像之间的偏差。通常是以修正图像与理想图像对应测量平面同名像点残差的均方差作为评价指标，残差均方差越小，表示标定修正的效果越好。如正交网格图像第 i 列、第 j 行节点的图像畸变修正后的成像位置是 (x_{ij}, y_{ij}) ，而理想成像位置是 $(\tilde{x}_{ij}, \tilde{y}_{ij})$ ，则修正结果的 x 方向和 y 方向残差均方差为：

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i,j} (x_{ij} - \tilde{x}_{ij})^2 / (N-1)}, \quad \sigma_y = \sqrt{\sum_{i,j} (y_{ij} - \tilde{y}_{ij})^2 / (N-1)} \quad (3.5.3)$$

其中 N 为正交网格节点总数。我们定义：如果用于标定获得畸变模型和用于修正评

价标定效果的是同一幅图像，则该残差均方差称为自标定残差均方差；如果不是同一幅图像，则该残差均方差称为互标定残差均方差。互标定残差均方差更能够反映标定结果用于实际胶片图像等数字化畸变修正能够达到的效果。根据我们的实践，在图像物面分辨率为 $20\mu\text{m}/\text{pixel}$ 的条件下，上述方法图像畸变标定和修正的精度优于 $1\mu\text{m}$ 。

3.6 像机安装参数标定方法

我们知道，像机直接测量得到的是目标相对于像机本身的位置姿态。而在许多摄像测量任务中，像机安装在像机平台上，目的是测量目标相对于像机平台而不是像机本身的位置姿态。为此需要研究掌握怎样将测得的目标体坐标系相对于像机坐标系的关系转换到相对于像机平台坐标系的关系。

摄像平台坐标系 B 、像机坐标系 C 和目标体坐标系 G 间的相对位置姿态关系示意如图 3.6.1。其中，描述目标体与像机之间相对位置姿态的是旋转矩阵 R_{GC} 和平移向量 T_{GC} ，描述目标体与摄像平台坐标系之间相对位置姿态的是 R_{GB} 和 T_{GB} ，描述像机与摄像平台坐标系之间相对位置姿态的是 R_{BC} 和 T_{BC} 。

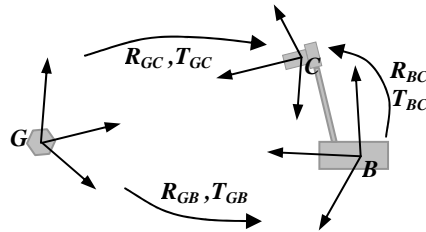


图 3.6.1 摄像平台坐标系、像机坐标系、目标体坐标系间的相对关系

根据空间解析几何知识，空间点 P 分别在摄像平台坐标系、像机坐标系和目标体坐标系下的坐标 P_B 、 P_C 和 P_G 间的坐标转换关系是

$$P_C = R_{GC}P_G + T_{GC}, \quad P_C = R_{BC}P_B + T_{BC}, \quad P_B = R_{GB}P_G + T_{GB} \quad (3.6.1)$$

对式(3.6.1)进行变换和移项，得到计算目标体坐标系与摄像平台坐标系间相对位置姿态关系的公式为

$$\begin{cases} R_{GB} = R_{BC}^{-1}R_{GC} \\ T_{GB} = R_{BC}^{-1}(T_{GC} - T_{BC}) \end{cases} \quad (3.6.2)$$

通过处理目标体图像直接得到的是目标系与像机系间的相对位置姿态 R_{GC} 、 T_{GC} 。为得到目标系与摄像平台坐标系间的相对位置姿态，需要在实施测量前标定像机系与摄像平台坐标系间的相对位置姿态，即标定出像机在摄像平台上安装参数：旋转矩阵 R_{BC} 和平移向量 T_{BC} 。本节介绍三种标定像机安装参数的方法：计算机视觉中经典的机器人手眼定标

法, 和本书作者提出全视场法、模拟对接法^[36]。

3.6.1 全视场法

(1) 采用辅助像机进行全视场法标定

该标定需要借助一台辅助像机。构造两组控制点, 其中一组控制点布设在测量像机安装平台上, 并且这组控制点在摄像平台坐标系中的坐标为已知; 另一组控制点布设在测量像机的视场范围内。这两组控制点都要在辅助像机的视场范围内。

标定中涉及的设备及其布局用坐标系表示, 如图 3.6.2。其中, B 为摄像平台坐标系, C 为测量像机坐标系, E 为定义标定参考点坐标的世界坐标系, 这里称为标定参考坐标系, C' 为辅助像机坐标系。所构造的两组控制点中, 布设在测量像机平台上的控制点在摄像平台坐标系中的坐标为已知, 称为摄像平台坐标系控制点。另一组控制点在标定参考坐标系中的坐标为已知, 称为标定参考系控制点。

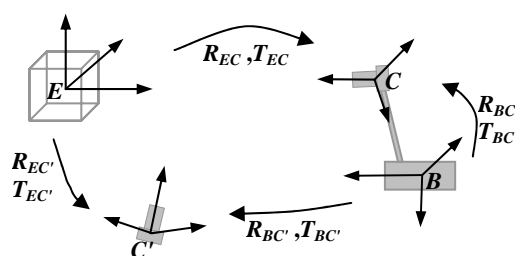


图 3.6.2 像机安装参数标定全视场法的坐标系表示

全视场法标定求解的过程如下。

首先用辅助像机采集同时包含标定参考系控制点和摄像平台坐标系控制点的图像, 标定出辅助像机分别相对于标定参考系的外参数 $R_{EC'}$ 、 $T_{EC'}$ 和相对于摄像平台坐标系的外参数 $R_{BC'}$ 、 $T_{BC'}$ 。同时用测量像机采集标定参考系控制点的图像, 并标定测量像机相对于标定参考系的外参数 R_{EC} 、 T_{EC} 。然后通过以下计算来标定测量像机与摄像平台坐标系间相对位置姿态参数 R_{BC} 和 T_{BC} 。

设空间某一点 P 在坐标系 B 、 C 、 E 和 C' 中的坐标分别为 P_B 、 P_C 、 P_E 和 $P_{C'}$, 则它们之间的坐标转换关系可用描述这些坐标系间相对关系的平移向量和旋转矩阵表示为

$$\begin{cases} P_C = R_{EC}P_E + T_{EC} \\ P_{C'} = R_{EC'}P_E + T_{EC'} \\ P_{C'} = R_{BC'}P_B + T_{BC'} \\ P_C = R_{BC}P_B + T_{BC} \end{cases} \quad (3.6.3)$$

对式(3.6.3)各式进行变换和移项可以得到

$$\begin{cases} R_{EC}^{-1}R_{BC} = R_{EC'}^{-1}R_{BC'} \\ R_{EC'}^{-1}(T_{BC'} - T_{EC'}) = R_{EC}^{-1}(T_{BC} - T_{EC}) \end{cases} \quad (3.6.4)$$

从而得到 R_{BC} 和 T_{BC} 的标定结果

$$\begin{cases} R_{BC} = R_{EC}R_{EC'}^{-1}R_{BC'} \\ T_{BC} = R_{EC}R_{EC'}^{-1}(T_{BC'} - T_{EC'}) + T_{EC} \end{cases} \quad (3.6.5)$$

(2) 以全站仪替代辅助像机进行全视场法标定

使用辅助像机进行全视场法标定时,要求辅助像机同时采集到标定参考系控制点和摄像平台坐标系控制点的图像,这需要辅助像机有较大视场,从而其空间分辨率会比较低,影响标定精度。而上述标定过程中的辅助像机可以用全站仪代替,也可以采用激光跟踪仪(Laser Tracker)、经纬仪等。全站仪能够高精度测量空间点,对于范围很大的“全视场”情况,以全站仪代替辅助像机能够提高标定参考系控制点和摄像平台坐标系控制点的定位精度,从而提高测量像机安装参数的标定精度。

使用全站仪进行全视场法标定时,图 3.6.2 中的 C' 为全站仪坐标系。测量像机与标定参考系之间的相对位置姿态参数 R_{EC} 、 T_{EC} 仍通过测量像机采集标定参考系控制点进行标定得到。标定参考系和摄像平台坐标系与全站仪坐标系之间的相对位置姿态参数 $R_{EC'}$ 、 $T_{EC'}$ 和 R_{BC} 、 T_{BC} 按下述方法得到。

首先用全站仪测出各个标定参考系控制点在全站仪坐标系中的坐标 P_C 。这些参考系控制点在标定参考系中的坐标已知为 P_E , 则 P_C 和 P_E 间的坐标转换关系为

$$P_C = R_{EC'}P_E + T_{EC'} \quad (3.6.6)$$

将其展开为关于 R_{EC} 和 T_{EC} 各元素的线性方程组,并对各个标定参考系控制点联立求解,就得到 $R_{EC'}$ 和 $T_{EC'}$ 。同理,再用全站仪测出各个摄像平台坐标系控制点在全站仪坐标系中的坐标 P'_C , 这些控制点在摄像平台坐标系中的坐标 P_B 为已知,列出坐标变换关系后可求解 R_{BC} 和 T_{BC} 。

至此, R_{EC} 、 T_{EC} 和 $R_{EC'}$ 、 $T_{EC'}$ 、 R_{BC} 、 T_{BC} 都已得到,将它们代入式(3.6.5)就得到 R_{BC} 和 T_{BC} 的标定结果。

3.6.2 模拟对接测定法

对于空间舱对接、机器人抓取合作目标(目标结构参数完全已知)等对接问题,需要在对接过程中实时测量两个对接体之间的相对位置姿态等运动参数。采用摄像测量方法时,通常在称为追踪器的对接体上安装摄像机,在称为目标器的对接体上设置若干位置已知的合作标志。在对接过程中摄像机连续拍摄目标器图像,提取合作标志,并结合像机安

装参数的标定结果，解算目标器相对于追踪器的位置姿态参数。

对于这类对接问题，达到对接状态时两个对接体之间的相对位置姿态关系是事先设定的。图 3.6.3 所示为模拟对接时的像机坐标系、摄像平台坐标系和目标体坐标系的关系。其中，目标体坐标系 G 与摄像平台坐标系 B 重合，因而它们与像机系间的相对位置姿态参数是相同的。此时，采集目标器上的合作标志图像，按照像机与合作目标之间相对位置姿态的测量方法，计算目标器相对于像机的旋转矩阵 R_{GC} 和平移向量 T_{GC} ，也就得到了像机与摄像平台坐标系之间的相对位置姿态参数 R_{BC} 和 T_{BC} 。关于合作目标位置姿态计算的方法将在第六章中介绍。

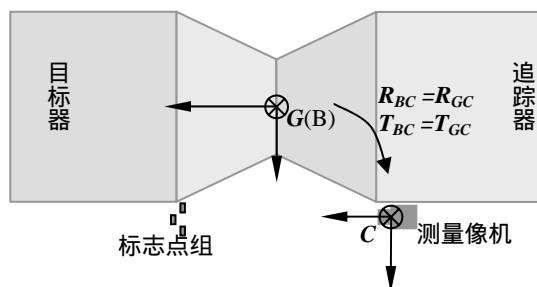


图 3.6.3 模拟对接测定中的坐标系关系

3.6.3 两步法手眼定标

如果摄像平台可以连同所安装的像机做运动参数精确已知的可控运动，则可以通过机器人手眼定标的方法来标定像机相对于摄像平台坐标系的位置姿态参数。

(1) 手眼定标问题

手眼定标问题源于眼在手上的机器人系统的应用。像机是手眼系统中的“眼”，而机器人的末端执行器是手眼系统中的“手”。像机固定安装在末端执行器上。末端执行器的运动可控，需要标定像机与末端执行器之间的相对位置姿态关系^[2]。

将手眼定标系统表示如图 3.6.4。其中 E 为标定参考坐标系，是基于标定参照物（如标定控制点）建立的。像机在 m 个方位采集标定参照物的图像。 B_0 和 C_0 为在初始位置的摄像平台坐标系和像机坐标系。 B_j 和 C_j 为在第 $j(j=1, \dots, m-1)$ 个位置的摄像平台坐标系和像机坐标系。摄像平台坐标系的运动可控，因而，描述处于不同位置时摄像平台坐标系之间相对位置姿态关系的旋转矩阵 $R_{B_j B_0}$ 和平移向量 $T_{B_j B_0}$ 为已知。像机相对于标定参考坐标系的外参数 R_{EC_0} 、 T_{EC_0} 和 R_{EC_j} 、 T_{EC_j} 通过采集标定参照物图像进行像机标定得到。处于不同位置时像机之间的相对位置姿态由旋转矩阵 $R_{C_j C_0}$ 和平移向量 $T_{C_j C_0}$ 来描述。像机与摄像平台坐标系间的相对位置姿态由旋转矩阵 R_{BC} 和平移向量 T_{BC} 描述，而且在各个采图位置，

这一关系是不变的。 R_{BC} 和 T_{BC} 就是需要通过手眼定标求解的参数。

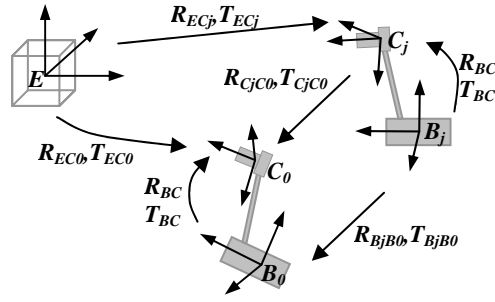


图 3.6.4 手眼定标系统的坐标系表示

仍用空间一点 P 分别在各坐标系下的坐标 P_E 、 P_{C0} 和 P_{Cj} 间的坐标转换关系来描述坐标系间的相对位置姿态，有

$$\begin{cases} P_{C0} = R_{EC0}P_E + T_{EC0} \\ P_{Cj} = R_{ECj}P_E + T_{ECj} \\ P_{C0} = R_{CjC0}P_{Cj} + T_{CjC0} \end{cases} \quad (3.6.7)$$

对式(3.6.7)各式进行变换和移项可以得到

$$\begin{cases} R_{CjC0} = R_{EC0}R_{ECj}^{-1} \\ T_{CjC0} = T_{EC0} - R_{CjC0}T_{ECj} \end{cases} \quad (3.6.8)$$

用空间一点 P 分别在处于不同位置的摄像平台坐标系 B_0 、 B_j 和像机坐标系 C_0 、 C_j 中的坐标 P_{B0} 、 P_{C0} 和 P_{Bj} 、 P_{Cj} 间的坐标转换关系来描述这几个坐标系间的关系，有

$$\begin{cases} P_{C0} = R_{BC}P_{B0} + T_{BC} \\ P_{Cj} = R_{BC}P_{Bj} + T_{BC} \\ P_{B0} = R_{BjB0}P_{Bj} + T_{BjB0} \end{cases} \quad (3.6.9)$$

对式(3.6.7)和式(3.6.8)第三式进行变换，并整理得到

$$\begin{cases} P_{C0} = R_{BC}R_{BjB0}P_{Bj} + R_{BC}T_{BjB0} + T_{BC} \\ P_{C0} = R_{CC0}R_{BC}P_{Bj} + R_{CC0}T_{BC} + T_{CC0} \end{cases} \quad (3.6.10)$$

从而得到手眼定标问题的基本方程

$$\begin{cases} R_{CjC0}R_{BC} = R_{BC}R_{BjB0} \\ R_{CjC0}T_{BC} + T_{CjC0} = R_{BC}T_{BjB0} + T_{BC} \end{cases} \quad (3.6.11)$$

如果能够从式(3.6.11)中求解出 R_{BC} 和 T_{BC} ，也就完成了手眼定标问题的求解。

(2) 手眼定标问题的两步法求解

一般用“两步法”求解基本方程式(3.6.11)，即先从第一式求出 R_{BC} ，再代入第二式求解 T_{BC} ^[37]。典型的求解方法有 Shiu 和 Tsai 提出的引入旋转轴-旋转角系统来描述旋转运动和

进行求解^[38,39]，以及 Chou、Zhuang、Daniilidis 等提出的应用四元数进行求解^[40-42]。下面介绍用旋转轴-旋转角系统述旋转运动来求解手眼定标基本方程的算法。

在旋转轴-旋转角系统中，旋转矩阵 R 定义了一个绕某一空间轴（旋转轴）旋转一个角度（旋转角）的运动， $R=R(k,\theta)$ 。其中， k 为单位向量，表示旋转轴的方向， θ 为旋转角。则如果

$$R_c(k_c, \theta)R = RR_d(k_d, \theta) \quad (3.6.12)$$

就有

$$k_c = Rk_d \quad (3.6.13)$$

关于该结论的证明，读者可以参阅有关的文献^[41,42]。

另外，为了唯一确定基本方程的解，要求摄像平台坐标系至少做不是纯平移的两次运动，即两次的旋转轴不互相平行。控制摄像平台做不是纯平移的两次运动，基本方程为

$$\begin{cases} R_{C1C0}R_{BC} = R_{BC}R_{B1B0} \\ R_{C1C0}T_{BC} + T_{C1C0} = R_{BC}T_{B1B0} + T_{BC} \\ R_{C2C1}R_{BC} = R_{BC}R_{B2B1} \\ R_{C2C1}T_{BC} + T_{C2C1} = R_{BC}T_{B2B1} + T_{BC} \end{cases} \quad (3.6.14)$$

其中， R_{B1B0} 、 T_{B1B0} 、 R_{B2B1} 、 T_{B2B1} 分别是摄像平台的两次运动参数，通过控制平台运动给出； R_{C1C0} 、 T_{C1C0} 、 R_{C2C1} 、 T_{C2C1} 分别是像机的两次运动参数，通过像机拍摄标定参照物对像机外参数进行标定后，由式(3.6.8)得到。

用旋转轴-旋转角表示旋转运动，根据式(3.6.13)的结论，有下式成立

$$k_{C1C0} = R_{BC}k_{B1B0} \quad k_{C2C1} = R_{BC}k_{B2B1} \quad (3.6.15)$$

由于 R_{BC} 同时将 k_{B1B0} 转到 k_{C1C0} 和将 k_{B2B1} 转到 k_{C2C1} ，则 R_{BC} 必然将 $k_{B1B0} \times k_{B2B1}$ 转到 $k_{C1C0} \times k_{C2C1}$ ，即有

$$[k_{C1C0} \quad k_{C2C1} \quad k_{C1C0} \times k_{C2C1}] = R_{BC} [k_{B1B0} \quad k_{B2B1} \quad k_{B1B0} \times k_{B2B1}] \quad (3.6.16)$$

由于摄像平台做的不是纯平移运动， k_{B1B0} 与 k_{B2B1} 不平行，于是得到 R_{BC}

$$R_{BC} = [k_{C1C0} \quad k_{C2C1} \quad k_{C1C0} \times k_{C2C1}] [k_{B1B0} \quad k_{B2B1} \quad k_{B1B0} \times k_{B2B1}]^{-1} \quad (3.6.17)$$

将的 R_{BC} 的计算结果代入式(3.6.14)的第二式和第四式，即可解出 T_{BC} 。

为了提高手眼定标的求解精度，可以控制摄像平台坐标系做更多次的运动并联立求解，还可以根据旋转矩阵的单位正交性对结果进行优化等。

参考文献

- [1] 王之卓. 摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1982.
- [2] 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.
- [3] 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(11): 43-55.
- [4] G. Xu and N. Sugimoto. A Linear Algorithm for Motion from Three Weak Perspective Images Using Euler Angles[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(12): 54-57.
- [5] W. Faig. Calibration of Close-range Photogrammetry Systems: Mathematical Formulation[J]. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1975, 41(12): 1479-1486.
- [6] Y. I. Abdel-Aziz, H. M. Karara. Direct Linear Transformation into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry[C]. Urbana: Proceeding Symp Close-Range Photogrammetry, 1971: 1-18.
- [7] K. W. Wong. Mathematical Foundation and Digital Analysis in Close-range Photogrammetry[C]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1975(44): 1355~1373.
- [8] H. M. Karara. Handbook of Close-Range Photogrammetry[M]. America Society of Photogrammetry, 1979.
- [9] R. Y. Tsai. A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4): 323-344.
- [10] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [11] R. I. Hartley. Estimation of Relative Camera Positions for Uncalibrated Cameras[C]. Proceedings of the ECCV92, 1992: 379-387.
- [12] R. I. Hartley. In Defence of the 8-point Algorithm[C]. Cambridge(MA): Proceeding 5th International Conference on Computer Vision, 1995: 1064-1070.
- [13] S. Maybank, O. Faugeras. A Theory of Self-calibration of a Moving Camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [14] R. I. Hartley. Euclidean Reconstruction and Invariants from Multiple Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(10): 1036-1041.
- [15] Triggs. Autocalibration and the Absolute Quadric[C]. In Proceeding International Conference on Pattern Recognition, 1997.
- [16] M. Pollefeys, L. Van Gool, and M. Oosterlinck. The Modulus Constraint: A New Constraint for Self-Calibration[C]. In Proceeding International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, 1996: 349-353.
- [17] Heyden, K. Åström. Euclidean Reconstruction from Image Sequences with Varying and Unknown Focal Length and Principal Point[C]. In Proceeding Conference Computer Vision and Pattern Recognition, 1997
- [18] M. Pollefeys, R. Koch, G. L Van. Self-calibration and Metric Reconstruction in Spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, 1998: 90-95.
- [19] R. I. Hartley. Self-Calibration of Stationary Cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22(1): 5-23.
- [20] 胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1149-1156.
- [21] S. D. Ma. A Self-calibration Technique for Active Vision System[J]. IEEE Transactions on Robot

Automation, 1996, 12(1): 114-120.

- [22] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [23] 胡占义, 雷成, 吴福朝. 关于 P4P 问题的一点讨论[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 770-776.
- [24] Z. Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration[R]. Microsoft Corporation: Technical Report, MSR-TR-98-71, 1998.
- [25] 权铁汉, 于起峰. 摄影测量系统的高精度标定与修正[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 748-755.
- [26] R. Hartley, A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. Cambridge University Press, 2000.
- [27] J. K. Aggarwal, Y. F. Wang. Analysis of a Sequence of Images Using Point and Line Correspondences[C]. Proceedings of IEEE International Conference of Robotics and Automation, 1987: 1275-1280.
- [28] S. Ma, G. Wei, J. Huang. Segment Based Camera Calibration[J]. Journal of Computer Science and Technology, 1993, 8(1): 11-12.
- [29] Y. Shang, Q. Yu, X. Zhang. Analytical Method for Camera Calibration from a Single Image with Four Coplanar Control Lines[J]. Applied Optics, 2004, 43(28): 5364-5369.
- [30] 张小苗. 机载视觉着陆导航测量方法及关键技术研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2008.
- [31] 傅丹. 基于直线特征从未标定图像重建三维结构[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2008.
- [32] M. A. Sid-Ahmed, T. B. Mohamed. Dual Camera Calibration for 3-D Machine Vision Metrology[J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1990(39): 512~516.
- [33] Andresen K, Hurber B. Calculation of Strain from an Object Grating on a Reseau Film[J]. Exp Mech, 1992: 96-101.
- [34] Yu Q F, Zhang D S. Accurate measurement of 3D Coordinates of an object with subpixel technique[C]. Proc of 1996 IEEE International Conference ON Systems, Man and Cybernetics. Beijing: 1996.
- [35] 雷志辉, 于起峰. 亚像素图像处理技术及其在网格法中的应用[J]. 国防科技大学学报, 1996, 18(4).
- [36] 尚洋. 基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2006.
- [37] C. C. Wang. Extrinsic Calibration of a Vision Sensor Mounted on a Robot[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(2): 161-175.
- [38] Y. C. Shui, S. Ahmad. Calibration of Wrist-Mounted Robotic Sensors by Solving Homogenous Transform Equations of the Form $AX = XB$ [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1989, 5(1): 16-29.
- [39] R. Y. Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision[C]. Proceedings of IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 364-374.
- [40] K. Daniilidis. Hand-Eye Calibration Using Dual Quaternions[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(3): 286-298.
- [41] J. C. K. Chou, M. Kamel. Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions[J]. The International Journal of Robotics Research, 1989, 10(3): 240-254.
- [42] H. Zhuang, Z. S. Roth. Comments on "Calibration of Wrist-mounted Robotics Sensor by Solving Homogeneous Transform Equation of the Form $AX=XB$ "[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 7(6): 877-878.

第四章 图像目标亚像素定位技术

利用摄像测量或光测图像技术进行各种精密测量时，主要有三个环节对测量精度起到关键的影响：一是摄像系统的物面分辨率；二是摄像系统的标定（如焦距、光心和光轴等内外系统参数）及其误差修正精度；三是图像中目标的定位精度。

在测量视场一定的条件下，提高光测系统测量精度最直接的方法就是提高摄像机分辨率，即增加像素点阵数。然而这种提高硬件分辨率的代价是相当昂贵的，例如将常用的 1024×1024 像素的像机系统提高到 2048×2048 像素的系统，价格上要差几倍，甚至十几倍。并且进一步提高硬件分辨率，价格可能成指数增长。伴随着在图像传输速度和图像存储容量方面都大大增加了对系统的要求，并且硬件性能指标的提高是有限。总之，通过提高硬件分辨率的方法来提高测量精度是不经济的和有限制的。

近二十多年来，在光测数字图像处理领域，许多研究者试图利用软件处理的方法来提高图像中目标的定位精度。如果能用软件方法将图像上的特征目标定位在亚像素级别，就相当于提高了测量系统精度。例如当算法的定位精度为0.1个像素，则相比于1个整像素定位精度的软件，相当于测量系统的硬件分辨率提高了十倍。因此对图像中目标进行高精度的定位就成为提高摄像测量系统测量精度的最重要的环节之一。这种亚像素图像定位技术具有十分重要的理论意义和实践意义，是摄像测量、光测数字图像分析技术中最重要的特色技术之一。本章介绍亚像素图像定位技术的基本原理和几种主要、常用的方法，重点是数字相关亚像素定位法，并介绍用于评价定位算法性能的仿真图制作原理和方法。

4.1 亚像素定位原理和算法设计原则

4.1.1 亚像素定位基本原理

对图像中目标进行定位是摄像测量和光测数字图像分析中最基本和最重要的任务之一。对目标进行定位通常要经过两个步骤：目标的粗定位和精定位。目标粗定位也就是目标识别，是指在某一特定的图像范围内确认是否有待测目标存在，并确认待测目标在某一特定的区域内。现已有大量的目标识别方面的算法，特别是在计算机视觉和模式识别领域有大量相关的工作，因此在目标的粗定位应用中可以直接参考借鉴这些算法。本书不对目标识别的工作做深入的介绍，而将重点放在精定位，即亚像素定位技术上。

许多人在一开始接触亚像素定位技术时，常有一个基本反应，即像素是组成图像的基本单位，也就是图像的分辨率，而亚像素精度是精度比图像分辨率还高，甚至高很多，

这似乎是违反常理的。

这种理解对通常的情况是正确的。但是亚像素定位技术是有应用前提的，即目标不是由孤立的单个像素点，而必须是由一组像素组成的、具有特定灰度分布和形状分布的特性目标，例如目标特征是圆点、角点、“十”字交叉点、直线、特征曲线等，有特定的灰度分布和一定面积大小。目标特性主要分为几何特性、灰度分布特性和几何与灰度耦合特性等三类，通常亚像素定位的目标特性为已知。

利用预知的目标特性，对图像目标进行处理分析（例如滤除噪声，增强特征，提取特征和拟合特征等），识别并确定与目标特征最吻合的位置。在此分析定位过程中，采用浮点运算，可实现对目标优于整像素精度的定位。这种利用目标特性从图像中分析计算出最符合此特性的目标位置的方法称为图像目标亚像素定位技术。

这里举一个简单的例子，在理想成像条件下，一个矩形经过数字化后，在数字图像中为一长度为四个像素，宽度为两个像素，中心坐标为(1.5, 0.5)的矩形，如图 4.1.1 所示。如果取整像素值作为目标中心坐标，则定位误差为 0.5 个像素值。而用形心法来计算目标各像素坐标的平均值，则可得到正确的目标中心亚像素精度的位置。可以说形心法就是一种最简单的亚像素定位算法。这里需要注意的是，整像素定位并不就是整像素精度，而是 0.5 像素精度，即目标真实位置在整像素定位结果的 ± 0.5 像素范围内。我们这里的亚像素定位多指的是定位精度优于 0.5 个像素的情况。

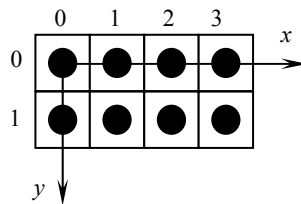


图 4.1.1 4×2 大小的长方形目标

从亚像素定位原理和上面的例子可以总结出应用亚像素定位技术需要的两个基本条件。第一，目标是由多个点组成的，并具有一定的几何和灰度分布特性。如果目标是一个孤立的像素，则其位置就是此像素的坐标位置，无法细分。通常只分析一个孤立的点（一个像素）是没有意义的。第二，对此具有一定特征的目标，必须明确目标定位基准点在目标上的具体位置。例如对于矩形目标，定位基准点是矩形的中心点，还是端点、角点；对某一目标定位基准点是目标中的最亮点或最暗点，还是灰度变化最大的点等等。待定位目标的特征可以是人为建立的理想模型，也可以是从某一实际图像中提取出的特定场景，或者是两者的结合。

目标亚像素定位技术的概念与通过对图像进行插值运算得到图像像素之间的灰度值和坐标值的概念是完全不同的。从理论上说,插值运算并没有增加新的信息量,只是根据插值算法的不同,假定像素间的灰度是按线性或插值公式的规定变化的。这种插值或重采样处理可以改善图像的视觉效果,但与目标特性这一重要信息无关,因而简单插值对目标亚像素定位精度并无帮助。实际目标在两像素间的光强变化可能不是线性的,而是在非中点处有明显的非线性变化,例如,对于人们通常关心的边缘、角点等特征点,实际光强灰度变化剧烈,通常不满足线性变化规律,对这种情形进行线性插值可能会给出更差的结果。并且插值过程完全保留了图像上的噪声和灰度偏差,这些因素带来的误差可能比插值带来的好处还要大。有些文献将线性插值处理也视为亚像素定位算法,概念上是不清晰、不严格的。

由于实际中存在的一些误差因素,如有限采样宽度带来的灰度平均效应、灰度量化误差和噪声等,因此对特定目标定位的亚像素算法精度是有限的。一般常用的亚像素定位算法的精度为 0.1 ~ 0.3 个像素,有些算法在理想的情况下可以达到 0.01 个像素的精度,对于较长的线型目标定位精度可能更高。

通常亚像素定位算法的精度可以通过仿真和实验的方法来检验。仿真方法是在数字图像中仿真制作若干已知精确位置的目标,并加入不同程度的噪声,然后用相应亚像素定位算法进行目标定位,并与仿真的目标位置真值相对比,最后根据统计原理计算出算法的精度。实验上可以用精密移动平台对某特征目标精确移动一个位移量,该位移量最好对应于图像上带有亚像素长度的距离,然后在位移前后的图像上检测此位移量,以此实际考核亚像素定位精度。

4.1.2 亚像素定位算法设计的一般原则

亚像素定位算法的设计和选用,有许多基本的原则和考虑。首先假设已经用特征检测识别方法对目标进行初步定位,即确定目标分布在某确定的局部区域内,有时能得到整像素精度的定位,我们称此过程为粗定位。然后进行亚像素定位分析,称为细定位。其次,为了使提出的算法是位置不变的,通常先建立一个局部坐标系,其原点建立在粗定位点处。这样可预先计算一些所需要的固定量,并且保持像素坐标为较小的数,从而改善数值计算特性,并可明显减少计算量。第三,许多亚像素定位技术是建立在一个局部图像模式或局部特征模式基础上的。根据选用的特征模式建立相应的模板,例如圆特征模板,“十”字丝模板等,边界可建模为线模型。然后确定一个模型有效区 Ω_m ,也称为搜索区,所建的目标模型在 Ω_m 上才有效,并且通常此区域上存在目标,我们在此区域

上搜索寻找目标点。另定义一个离散模型支持区 Ω ，它与所建立的特征模板的尺寸相同，每一次只有在 Ω 区上的像素点参加计算。通常 Ω_m 必须大于 Ω 。

此外，图像的离散特性是我们设计亚像素定位算法时的基本出发点，而不应该是事后考虑的因素。将连续算法离散化实际引入了许多隐含的假设，特别是对一模拟连续信号的离散处理有要求频谱是有限带宽的限制。同时，每一种亚像素定位算法都应有一个适当的二维扩展应用，而不应是一维算法的经验推广。有些亚像素定位算法将感兴趣的特征不必要地细化为点来考虑，例如在提取某一特定形状的边界曲线时，将算法细化为沿边界逐点在法线方向细定位每个边界点。而通常将目标特征整体来考虑会更有益处。例如将直线边界用下面 4.3.5 节的局域模型法表示可得到精度更高的结果；将圆光团目标看成是二维的高斯曲面分布目标，比用圆目标的边界圆来描述定位的算法稳定性更好、精度更高。具体的亚像素定位方法有多种，应根据实际情况设计选用。

下面分别介绍常用的几类亚像素定位方法和应用实例。

4.2 矩方法

矩方法是计算机视觉与模式识别中广泛使用的简单方法，主要用于目标识别中。在精密光测图像处理中，根据一个物体的矩特性在成像前后保持不变的原理，将矩方法应用于圆、椭圆和矩形等中心对称目标，以及边缘和角点等目标的亚像素定位中。

4.2.1 矩的定义

矩作为数学上的完备描述，相当于原函数在新的坐标空间上展开，即一个分段连续有界函数可用其矩族唯一表示。

一维连续函数 $f(x)$ 的 p 阶空间矩 m_p 和灰度矩 \bar{m}_p 的定义为

$$m_p = \int x^p f(x) dx, \quad \bar{m}_p = \int f^p(x) dx \quad (4.2.1)$$

二维连续函数 $f(x, y)$ 的 $p+q$ 阶空间矩和 p 阶灰度矩的定义分别为

$$m_{pq} = \int x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad \bar{m}_p = \int f^p(x, y) dx dy \quad (4.2.2)$$

相应的离散数字图像 $I(i, j)$ 中目标区域 S 的 $p+q$ 阶空间矩和 p 阶灰度矩的定义分别为

$$m_{pq} = \sum_{(i,j) \in S} i^p j^q I(i, j), \quad \bar{m}_p = \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in S} I^p(i, j) \quad (4.2.3)$$

其中 n 为区域 S 中的像素点数。

4.2.2 形心和灰度重心法

形心法和灰度重心法^[1~3]是对图像中圆、椭圆和矩形等中心对称目标进行高精度亚像

素定位的常用算法，它用到了零阶矩和一阶矩，是最简单的矩方法。

(1) 形心法

首先对图像进行二值化分割，将目标区域识别出来，目标区内的灰度值为常数 I ，而非目标区灰度值为 0。再用形心法对二值图像中目标的形心 (x_0, y_0) 进行定位：

$$x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iI}{\sum_{(i,j) \in S} I} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i}{N}, \quad y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jI}{\sum_{(i,j) \in S} I} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j}{N} \quad (4.2.4)$$

由于图像中存在噪声，因此目标区域的二值化分割将产生误差，目标边界会存在一些毛刺，为了消除这些毛刺对定位精度的影响，可对目标进行预处理，如形态学的扩张、侵蚀、开启和闭合等运算。当目标区域面积适中时，形心法的精度可以达到 0.1~0.3 个像素。如果仅用目标边缘来计算中心点，也称为周线平均法(Average of perimeter)，由于仅利用了目标区域边界的信息，定位精度较低。

(2) 灰度重心法

灰度重心法可以看成是以目标各像素灰度为权值的加权形心法。灰度图像 $I(i, j)$ 中目标的灰度重心 (x_0, y_0) 为

$$x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iW(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i, j)}, \quad y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jW(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i, j)} \quad (4.2.5)$$

其中 $W(i, j)$ 为权值，取 $W(i, j)$ 为原图像灰度 $I(i, j)$ ，而不是形心法中的常数。对于背景灰度值较小，而目标灰度值较高的情况，例如天文图像中的恒星，其目标的灰度分布多为抛物面或高斯曲面，此时灰度重心法通常可以获得较高的定位精度。但是由于实际图像中目标特征情况复杂，例如亮背景上的暗目标、目标和背景的灰度值都比较大等，用灰度作为权重并不适用于所有的情况。

这里给出一种常用的带阈值的权值选取方法。对于目标灰度值大于背景灰度值的情况，权重 $W(i, j)$ 为

$$W(i, j) = \begin{cases} I(i, j) - T & I(i, j) > T \\ 0 & I(i, j) \leq T \end{cases} \quad (4.2.6)$$

而对于目标灰度值小于背景灰度值的情况

$$W(i, j) = \begin{cases} T - I(i, j) & I(i, j) < T \\ 0 & I(i, j) \geq T \end{cases} \quad (4.2.7)$$

其中 T 为区分目标和背景的灰度阈值。

此外还可以将式(4.2.5)中的灰度权值取平方,形成灰度平方重心法^[1],使得目标灰度分布的权重得到进一步的突出,在理想情况下,可能得到比灰度重心法更好的定位精度。

形心法和灰度重心法的算法非常简单明了,但通常形心法只对几何特性对称的目标,灰度重心法只对灰度分布没有畸变的目标才能获得理想的效果。当目标是靠斜投影方法形成(目标距离光轴较远),或者当目标平面与图像平面有较大的夹角时,目标的形心和重心会发生偏移。例如图 4.2.1(a)中,目标平面与图像平面不平行而发生透视变形,图像上目标的中心并不对应实际目标的中心;图 4.2.1(b)中,目标成像后灰度分布畸变,灰度重心并不对应目标中心。这时对目标用二值化形法定位,或用灰度重心法定位将会产生较大的误差。这种误差很可能大于人们所期望的亚像素精度。因此形心法通常应用于目标图像本身不变形的场合,例如标定用的基准标志、激光光点等。对于目标图像本身可能会产生变化的情况,要先考虑形心、灰度重心的物理意义和实际条件,以决定形心法和灰度重心法的使用和精度。

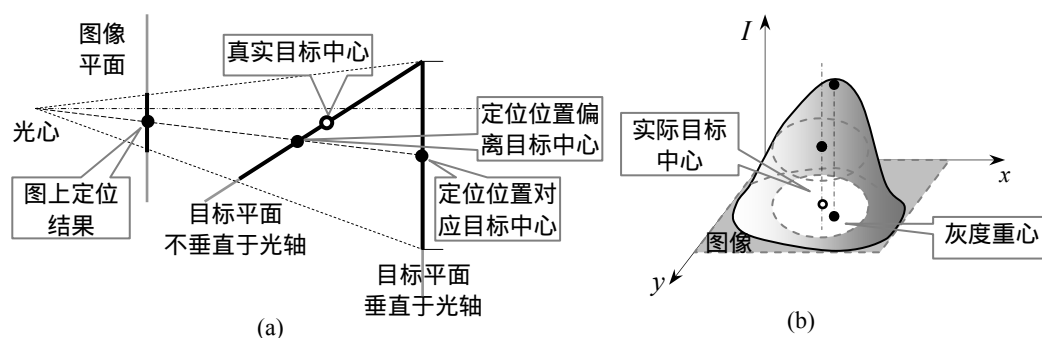


图 4.2.1 图上目标形心或灰度重心不对应实际目标中心的情况

4.2.3 灰度矩边缘定位法^[4]

灰度矩边缘定位法是一种利用前三阶灰度矩来对边缘进行亚像素定位的算法。灰度矩边缘定位法的基本原理是假设图像中的实际边缘分布与理想阶跃边缘模型的灰度矩保持一致,即矩不变。通过此关系来确定实际边缘的位置。

一维理想阶跃边缘模型可以认为是由一组具有灰度 h_1 与一组具有灰度 h_2 的像素相接而构成的。这个一维理想边缘由三个参数决定:边缘位置 k 、边缘两侧的灰度值 h_1 和 h_2 。如图 4.2.2 所示,其中离散点表示实际边缘点,粗折线表示理想边缘。

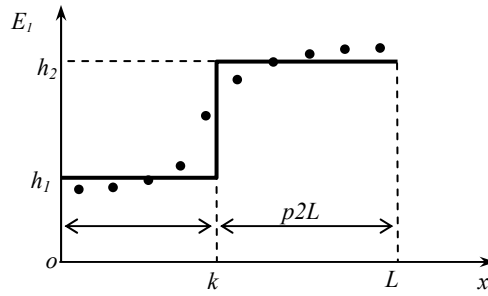


图 4.2.2 一维理想边缘和实际边缘点

设 $u(x)$ 为理想阶跃函数，则一维理想边缘函数可表示为

$$E_1(x) = (h_2 - h_1)u(x - k) + h_1 \quad (4.2.8)$$

设 p_1 和 p_2 分别表示灰度值为 h_1 和 h_2 的像素点所占整个边缘对象的比例，两者满足如下的关系

$$p_1 + p_2 = 1 \quad (4.2.9)$$

设单调序列 $g_j (j=1,2,\dots,n)$ 为实际边缘点的灰度值，其中 g_i 的第一个像素的位置取为 0，则该序列的前三阶灰度矩满足下式：

$$\bar{m}_i = \sum_{j=1}^n p_j h_j^i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_j^i, \quad i=1,2,3 \quad (4.2.10)$$

其中 n 为实际边缘点的总个数， $p_1=k/n$ 。上式三个方程中包含三个未知数 p_1, h_1 和 h_2 ，求解可得

$$h_1 = \bar{m}_1 - \bar{\sigma} \sqrt{p_2/p_1}, \quad h_2 = \bar{m}_1 + \bar{\sigma} \sqrt{p_1/p_2}, \quad p_1 = \frac{1}{2} \left[1 + \bar{s} \sqrt{\frac{1}{4 + \bar{s}^2}} \right] \quad (4.2.11)$$

其中

$$\bar{\sigma}^2 = \bar{m}_2 - \bar{m}_1^2, \quad \bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{m}_1)^3}{\bar{\sigma}^3} = \frac{\bar{m}_3 + 2\bar{m}_1^3 - 3\bar{m}_1\bar{m}_2}{\bar{\sigma}^3} \quad (4.2.12)$$

由式(4.2.11)第三式得到边缘位置

$$k = np_1 - \frac{1}{2} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{\bar{s}}{4 + \bar{s}^2}} + \frac{n-1}{2} \quad (4.2.13)$$

理论和实验表明：(1)灰度矩定位法具有对灰度平移和缩放的不变性；(2)序列的长度对边缘定位影响很小；(3)加性噪声具有将真实边缘位置向序列中心移动的趋势，当边缘位置位于序列中心时其均方误差最小。我们的实际应用表明，该方法的定位精度并不高，工程中很少采用。

上述一维边缘定位矩方法可推广到对二维边缘进行定位，具体算法可参见文献[4]。

4.3 拟合法

在图像处理分析中，基于最小二乘准则的函数拟合是一个有效的数学工具。拟合法的意义是对带有误差或噪声的数据用某种数学模型在最小二乘意义下拟合、回归数据，得到模型参数，从而得到抑制掉噪声的新数据。常用的拟合方法有多项式、高斯函数和椭圆拟合等。拟合法的物理意义与数学插值明显不同，它的前提是认为数据本身带有误差或噪声，通过拟合来抑制噪声，回归数据。而数学插值计算认为原始数据是真值，用某种模型将原数据之间的、空缺的值插出来，或恢复出来。因此数学插值没有抑制噪声的功能。从第一章的实际数字图像的采集原理和过程中我们知道，实际数字图像不可避免地存在噪声，对数字图像的处理通常都采用拟合法意义的处理，以有效地应对噪声。

使用拟合法的前提通常是目标的特性已知或假定其特性满足某种函数形式，例如图像的测量物体灰度分布形式、阴影模式、噪声模式等。通过对离散图像中的目标的灰度和坐标进行拟合，可以得到目标的多种函数形式，从而确定描述物体的各个参数值(例如位置、尺寸、形状、幅度、相关系数分布等)，对目标进行亚像素定位。拟合处理可以滤除图像的噪声，或者对图像中特性已知的物体进行建模等，例如对星空图像中的恒星，可以通过对超过某一阈值的像素点进行二维曲面或高斯函数拟合，选取拟合函数的最值点或极值点作为目标的定位点。

4.3.1 多项式拟合

(1) 曲线拟合

如图 4.3.1 所示，对于给定的一个点系列 (x_i, y_i) ，用最小二乘法拟合一个函数 $f(x)$ ，也就是求解函数 $f(x)$ 的最佳参数取值，使该曲线到各个数据点的某种距离的均方误差(MSE)为最小。此拟合可通过下式给出：

$$\text{Min}(MSE) = \text{Min} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2 \quad (4.3.1)$$

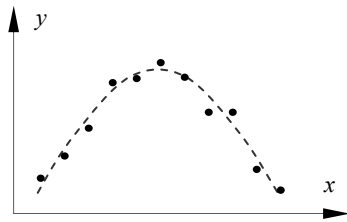


图 4.3.1 曲线拟合示意图

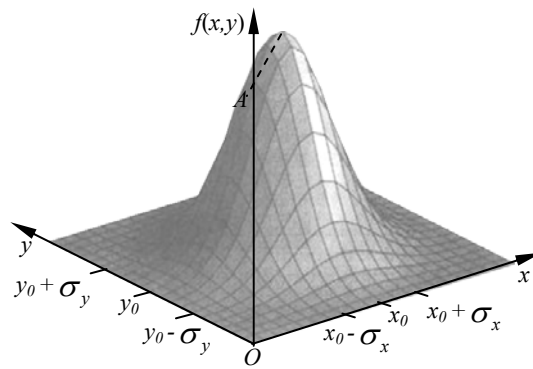


图 4.3.2 二维高斯曲面

下面以 $f(x)$ 选为二次抛物曲线为例说明最小二乘拟合：

$$f(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 \quad (4.3.2)$$

设给定点的个数为 m ，未知系数个数为 n ，并且 $m \geq n$ ，则可以得到矩阵形式的超定方程组：

$$BC = Y \quad (4.3.3)$$

$$\text{其中：} Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_m & x_m^2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}。$$

对上式进行求解就可以得到二次抛物曲线 $f(x)$ 中的系数。最小二乘拟合求解是常规算法，这里不再赘述。

(2) 曲面拟合

可以将上面的曲线拟合技术推广到二维曲面拟合中。下面以常见的三次曲面为例来说明曲面拟合法。表示三次曲面的二元三次多项式如下

$$f(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3x^2 + c_4xy + c_5y^2 + c_6x^3 + c_7x^2y + c_8xy^2 + c_9y^3 \quad (4.3.4)$$

在图像中像素点系列 $f(x_i, y_i)$ 的 (x_i, y_i) 代表坐标值， f 代表灰度值。对 $f(x_i, y_i)$ 推导最小二乘拟合公式，得到式(4.3.3)表示的方程组式，其中矩阵 B 为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & y_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4.3.5)$$

求解式(4.3.5)得到各个系数 c_i 就得到了与原图像像素系列 $f(x_i, y_i)$ 的均方误差 (MSE) 为最小的三次曲面函数的新图像灰度分布。

4.3.2 高斯分布拟合

对图像中光团、圆点等具有高斯分布特性的目标进行如图 4.3.2 的二维高斯曲面拟合^[5]，从而实现对该类目标的亚像素定位。

一个二维高斯方程表示为

$$f(x, y) = A \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (4.3.6)$$

其中 A 是幅值， σ_x ， σ_y 是两个方向上的标准差。对上式两边取对数、展开平方项并整理得

$$f \ln f = \left[\ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}\right]f + \frac{x_0}{\sigma_x^2}[xf] + \frac{y_0}{\sigma_y^2}[yf] + \frac{-1}{2\sigma_x^2}[x^2f] + \frac{-1}{2\sigma_y^2}[y^2f] \quad (4.3.7)$$

将由 N 个数据点组成的方程组写成矩阵形式为

$$Q = BC \quad (4.3.8)$$

其中 Q 是一个 $N \times 1$ 向量，其元素为

$$q_i = f_i \ln f_i \quad (4.3.9)$$

C 是如下的一个完全由高斯参数复合的向量

$$C^T = \left[\ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}, \frac{x_0}{\sigma_x^2}, \frac{y_0}{\sigma_y^2}, \frac{-1}{2\sigma_x^2}, \frac{-1}{2\sigma_y^2}\right] \quad (4.3.10)$$

B 是一个 $N \times 5$ 矩阵，其第 i 行为

$$[b_i] = [f_i, f_i x_i, f_i y_i, f_i x_i^2, f_i y_i^2] \quad (4.3.11)$$

用最小二乘求解得到向量 C 的各个元素值，就可以得到高斯函数的各参数为

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{-\frac{1}{2}c_4}, & x_0 = c_2 \sigma_x^2 \\ \sigma_y = \sqrt{-\frac{1}{2}c_5}, & y_0 = c_3 \sigma_y^2 \\ A = \exp\left[c_1 + \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}\right] \end{cases} \quad (4.3.12)$$

4.3.3 椭圆曲线拟合

当目标特征是圆或椭圆时，对提取的一组目标边界点进行椭圆最小二乘拟合，从而确定椭圆目标的中心位置和主轴方向。

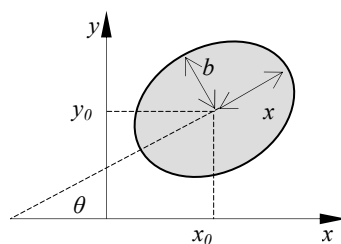


图 4.3.3 确定图像椭圆的参数

二次曲线的一般方程为

$$x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0 \quad (4.3.13)$$

如果满足

$$\begin{cases} B^2 - C < 0 \\ (1+C)(CF + 2BDE - D^2C - B^2F - E^2) < 0 \end{cases} \quad (4.3.14)$$

式(4.3.13)就代表一个椭圆，其均方差和为

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + 2Bx_i y_i + Cy_i^2 + 2Dx_i + 2Ey_i + F)^2 \quad (4.3.15)$$

分别对上式关于 B, C, D, E, F 取偏导，令每个式子为零，可以得到一个包含五个方程和五个未知数的静定方程组。用矩阵求逆或高斯列主元消去等方法可以求解得到椭圆方程的参数。

确定一个椭圆的五个参数为中心点坐标 (x_0, y_0) ，长短半轴 (a, b) 和长轴与 x 轴的夹角 θ ，如图 4.3.3。下面给出亚像素定位所关心的椭圆的中心坐标和夹角 θ 的计算公式

$$x_0 = \frac{BE - CD}{C - B^2}, \quad y_0 = \frac{BD - E}{C - B^2} \quad (4.3.16)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \text{tg}^{-1} \left(\frac{2B}{1 - C} \right) \quad (4.3.17)$$

为了抑制图像噪声的影响从而提高椭圆定位精度，可对椭圆边界进行第二次拟合。即第一次拟合后，将每个边界点代入拟合结果公式，计算每个点的残差。然后将残差较大的一部分点去除掉，通常每次可去除掉 1~5% 的点。再对剩余点进行第二次椭圆拟合。该拟合过程可重复若干次，直到均方差和小于某一阈值。

4.3.4 拟合亚像素边缘定位法

(1) 单边阶跃边缘的成像模型

由于实际透镜成像是有一定频率带宽限制的，即受到调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的截止频率的制约，所以实际透镜成像系统的作用相当于一个低

通滤波器。对于不同的成像系统，其调制传递函数不同。成像系统的调制传递函数也可以用点扩展函数(Point Spread Function, PSF)来等效表示。通常假设成像系统的点扩展函数是对称的，满足高斯分布，可以表示为

$$h(x) = \frac{1}{t\sqrt{\pi}} \exp[-(x/t)^2] \quad (4.3.18)$$

其中 t 为常数。点扩展函数也可以假设为如下的多项式和指数函数形式

$$h(x) = 1 - (x/a)^2, \quad |x| \leq a, \quad a > 0 \quad (4.3.19)$$

$$h(x) = \exp(-|x|/t)/2 \quad (4.3.20)$$

设图像中理想阶跃边缘模型 $E_I(x)$ 为

$$E_I(x) = Cu(x) \quad (4.3.21)$$

其中 $u(x)$ 为理想阶跃函数， C 为边缘对比度。

由于实际图像可由成像系统的 PSF 与理想图像函数的卷积来表示，因此实际图像中的边缘模型 $E_R(x)$ 可以表示为

$$E_R(x) = E_I(x) * h(x) \quad (4.3.22)$$

这里 $*$ 表示卷积。上式表示，理想阶跃边缘经透镜系统成像后，阶跃处已成为连续渐近的边缘，如图 4.3.4 中虚线所示。对上式求导得到

$$E'_R(x) = E'_I(x) * h(x) = C\delta(x) * h(x) = Ch(x) \quad (4.3.23)$$

其中 $\delta(x)$ 为理想脉冲函数。即实际边缘的一阶导数分布与成像系统的点扩散函数分布一致。由此可知，不论将式(4.3.18)~(4.3.20)中 PSF 的哪一种形式 $h(x)$ 代入前式，在边缘处的灰度已是非阶跃分布。但此边缘处的灰度导数值最大，是一阶导数的最大值点，也是二阶导数的过零点，即拐点。这一分析结论与实际情况符合，这也是许多边缘检测算法以一阶导数极值点或二阶导数过零点作为边缘点的基本理论依据。为了计算简便，实际中通常选择如式(4.3.19)的二次多项式作为点扩展函数。

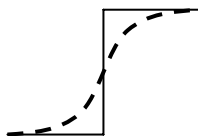


图 4.3.4 理想阶跃边缘成像后成为连续渐近边缘

(2) 常用拟合亚像素边缘定位法

1) 边缘灰度拟合^[6~8]

如果假设点扩展函数为如式(4.3.19)的二次多项式，由式(4.3.22)可知，边缘的灰度分

布为三次解析曲线。因此可以根据最小二乘原理，用三次多项式来拟合边缘的灰度值，取其拐点为亚像素精度的边缘位置，如图 4.3.5。根据实际情况，采用不同的点扩展函数类型可以获得不同的拟合函数类型和不同的亚像素边缘定位精度。

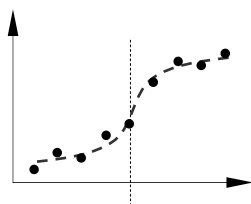


图 4.3.5 取三次多项式拟合拐点定位边缘

对于二维边缘提取，用二元三次多项式模型对边缘附近区域进行曲面拟合是一种简单常用的方法。而 Hueckel 将边缘区域灰度值在 Hilbert 空间拟合得到若干个参数，然后将这些参数与理想边缘的参数做比较，从而得到边缘的亚像素位置。由于是直接对边缘灰度值进行拟合，因此这些方法具有较好的抗噪声能力。

2) 边缘灰度导数值拟合^[9]

如果能获得边缘的一阶导数值，可以直接用特定的点扩展函数，对边缘导数值进行拟合，从而得到边缘的亚像素位置。但是由于存在噪声，并且求导对噪声较敏感，通常很难获得准确的灰度导数值。因此这种方法抗噪声能力差，边缘定位精度较大地依赖图像的信噪比。

3) 拟合插值法^[6,10,11]

许多常用的边缘定位算法可以达到整像素定位精度，如果将这些算法应用于插值放大的图像上，在实际图像灰度分布规律与插值规律相一致的前提下，可以得到亚像素的定位精度。

4.3.5 局域模型法

局域模型法是亚像素定位技术中的一种有效的、精度较高的方法。它的主要思想是对感兴趣的小区域拟合某种参数化模型。模型的形式及尺寸是该方法考虑的主要因素。模型的选择与建立必须基于物理理性观察和推理之上，使得模型能最佳地或良好地与对象的特性匹配，并且应选取可以直接读到或衡量目标特征的重要信息作为模型参数，例如目标的方向角、中心位置等。

虽然对数据进行最小二乘意义上的多项式曲面拟合是一种常用的有效算法，但是一个完整的多项式模型未免过于通用，因为它可以描述任何对象而不能将特征的信息具体化、显式化。我们应根据具体特征，选定具体的多项式。

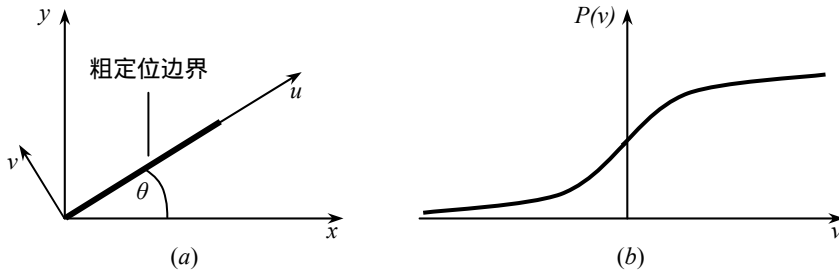


图 4.3.6 局域模型法

例如，假设感兴趣的对象是一直线边界的位置和方向。如果认为图像系统的点扩展函数是局部空间不变的，则边界形貌的基本特性在局部区域内也是不变的。首先在粗定位基础上建立一局部坐标系 (x, y) ，然后将此坐标系旋转 θ 角度而产生一个新局部坐标系 (u, v) ，其中 u 轴指向边界的切向， v 轴指向边界的法向，如图 4.3.6(a)所示

$$v = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (4.3.24)$$

假设边界法向的形貌可由一个 n 次多项式来模型化，如图 4.3.6 (b)所示。

$$p(v) = \sum_{i=0}^n a_i v^i \quad (4.3.25)$$

则可建立三维边界形貌的模型：

$$P(x, y) = \sum_{i=0}^n a_i (-x \sin \theta + y \cos \theta)^i \quad (4.3.26)$$

在给定的搜索区域 Ω_m 上，取区域 $\Omega = \Omega_m$ ，用 $I = \{(x_i, y_j) : i=1, \dots, N\}$ 表示在 Ω 区上的离散点序列， f 是在 I 中的点数据值组成的一个向量。对于给定的点集 I ，我们可以认为 P 是 (a, θ) 的函数，并且写成：

$$P(a, \theta) = S(\theta)a \quad (4.3.27)$$

其中 $S(\theta)$ 是取决于参数 θ 的矩阵：

$$S(\theta)_{ij} = (-x_i \sin \theta + y_i \cos \theta)^j \quad (4.3.28)$$

这里我们希望求解：

$$\min_{\theta, a} \|f - S(\theta)a\|^2 \quad (4.3.29)$$

求解上式得到 θ 和 a 的解， θ 显式地表示了边缘直线的角度值，比用多项式等通用形式能更好地表现目标特性。我们在建立目标模型时应尽量用这类模式。

4.3.6 目标采样位置和目标尺度对拟合法定位精度的影响

数字图像是将实际光学图像在空间和光强上离散化为像素的结果，这种离散化与原来连续光强目标是有区别的。要恢复原图像的信息，采样必须满足奈奎斯特定理。同理，对目标的拟合定位也要满足一定的采样和尺度要求。例如当目标只有一个像素尺度的极限情况时，任何目标模型的拟合都是没有意义的，无法进行亚像素定位。下面分析目标的采样位置和目标尺度对定位精度的影响。

(1) 目标采样位置对定位精度的影响

双阶跃直线的截面、圆光团的截面等目标的灰度分布可视为一维高斯分布。这里以一维高斯分布的目标为例进行分析。

设一维高斯函数为 $f(x) = A e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ ，如图 4.3.7 中实线所示。

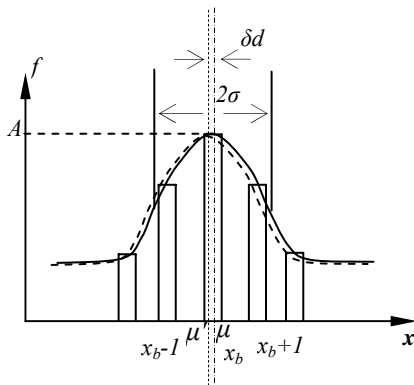


图 4.3.7 一维高斯函数采样拟合

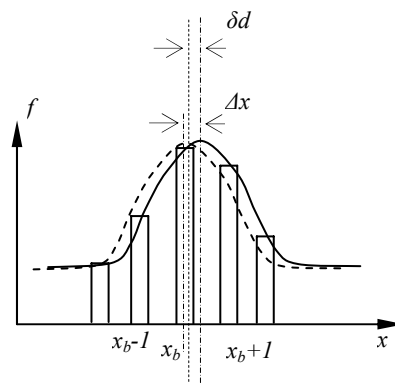


图 4.3.8 一维高斯函数移位采样拟合

这里将 2σ 称作高斯函数的宽度。函数 $f(x)$ 在整数点位置 x_k 的抽样值 $g(n_k)$ 通过对 $f(x)$ 取整得到。根据 $g(n_k)$ 拟合得到的高斯函数为图 4.3.7 中虚线所示。拟合函数的函数极值点 μ' 与原函数极值点 μ 之间的距离 δ_d 即为拟合的极值位置误差 $e_{\mu\sigma}$ 。

图 4.3.7 中 $f(x)$ 极值点位置在整数点 $x_b = \mu$ 处，当 $f(x)$ 沿 x 轴平移 $\Delta x = \Delta\mu$ ，极值点移到 $x_b + \Delta x$ ，如图 4.3.8 实线所示。根据平移后的 $g(n_k)$ 值拟合得到的高斯函数为图 4.3.8 中虚线所示。由于灰度值的量化级别较多，只要是对无噪声函数值的采样，则微小位移后拟合得到的曲线极值点位置误差很小，仿真结果表明在百分之一像素级别。在目标成像对比度较好的情况下，这种误差可不予考虑。图 4.3.9 的数值模拟结果直观表示了对于理想灰度分布的截面，极值位置误差 e_{μ} 与函数平移量 $\Delta\mu$ 的关系，即定位精度与极值点采样偏离整像素位置的关系。实验选取 $A=50$ ，线宽度 $\sigma=1.5$ 像素， $\mu=150+\Delta\mu$ ， $\Delta\mu$ 为可变的移动小量。从图中看出采样点偏移引起的误差基本在百分之一像素内。

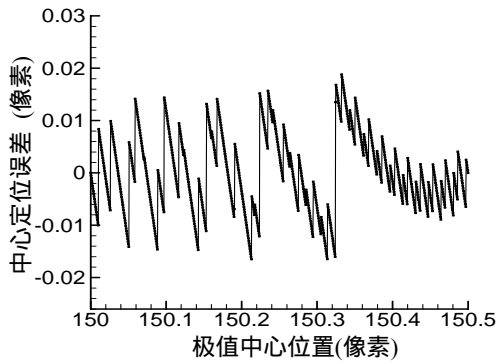


图 4.3.9 采样位置变化对定位误差的影响

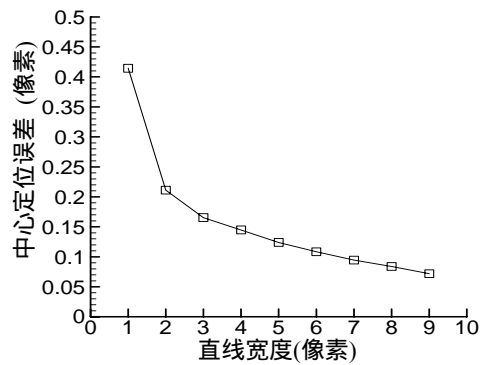


图 4.3.10 不同宽度直线截面中心定位误差

(2) 目标尺度对定位精度的影响

在实际图像中，由于目标灰度噪声的存在，当采样点恰好位于噪声处时，如果目标尺度较小，即参与计算的点数较少，拟合得到的定位误差就会较大，而随着目标尺度增大，参与计算的点数增多，噪声对于定位的影响就会变小。将高斯函数看作直线截面的灰度分布，图 4.3.10 给出了不同尺度的直线截面中心在受噪声干扰情况下用高斯拟合定位的结果。

另一方面，当目标尺度过大时，函数分布将趋于平滑，边缘变化平缓，定位性能也会下降。大量实验表明，直线宽度为 5~11 个像素时可达到最优的定位结果。

数字采样中光学成像的采样位置、采样个数都会对拟合定位精度产生直接影响，在高精度测量时应予考虑。如利用点目标定位时，目标的成像尺度应选择适当大小，一般选择 3×3 像素到 15×15 像素之间。

4.4 数字相关亚像素定位法

在图像目标定位技术中，数字相关法具有原理简单、直观、适应性强和精度高等优点，因此得到了广泛的应用，是亚像素定位技术中最重要、最常用的方法。下面较详细地介绍数字相关亚像素定位法的原理和影响因素、环节。

数字相关的基本原理是基于互相关函数的相关特性，两个函数的互相关函数定义为

$$C(\tau) = \int_M f(t+\tau)g(t)dt \quad (4.4.1)$$

互相关函数可衡量两个函数在不同偏移量下的相似程度。当两个函数完全重合时，互相关函数取最大值。若两个函数完全相同，但是存在一定的位移量，则当相关函数取最大值时，变量 τ 就是两个信号的偏移量。这就相当于利用已知的函数 $g(t)$ 来确定未知函数 $f(t)$ 与 $g(t)$ 一致部分的位置。如图 4.4.1。

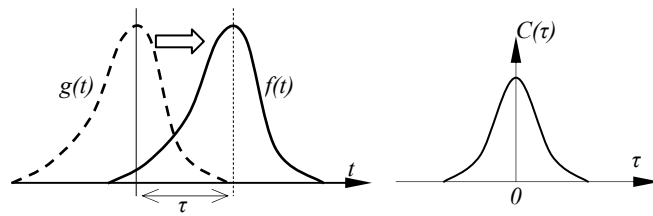


图 4.4.1 用互相关函数衡量两个函数在不同偏移量下的相似度

在数字相关运算中通常利用包含已知目标的像素灰度矩阵作为已知函数 $g(t)$ ，又称为模板。用模板对待搜索目标区域进行相关运算，并取相关系数最大值以确定目标的位置。在数字相关法中模板的建立、相关算法的选取和相关搜索策略是影响数字相关法定位精度的关键因素，下面分别介绍这些因素。

4.4.1 相关模板的选取与建立

相关模板选取通常有以下两种形式：

(1) 理想模板

根据待定位目标的几何与灰度特性，用数学解析表达式或离散数学形式来仿真制作的模板称为理想模板。该理想模板应尽量与目标特征重合、一致，甚至更突出目标特征。通常模板矩阵的中心为理想目标点位置。如果模板选取、建立得恰当，理想模板相关法可以得到很高的定位精度。

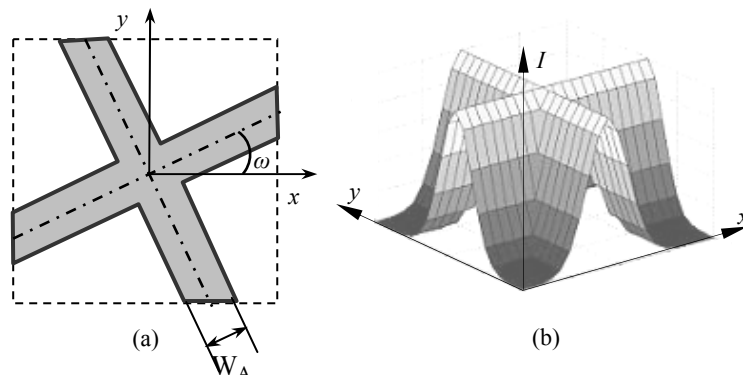


图 4.4.2 正交网格节点理想模板示意图

例如对于“十”字丝标志或者是正交网格节点的模板建立步骤如下：先估计出“十”字丝或网格节点的宽度 W_A 和倾角 ω 等参数，如图 4.4.2(a)所示。然后根据此标志的几何参数和灰度分布特性来制作理想模板，图 4.4.2(b)为灰度沿网格线法向为高斯分布的理想模板的位置-灰度三维曲面图。

(2) 实际图像目标模板

可以在已知目标特性的实际图像上首先确定目标位置，然后以该目标位置点为中心

选取一定尺寸的局部区域的灰度图像（矩阵）作为模板。这里模板矩阵的宽度和高度一般取奇数，不在整像素位置的点可以通过插值来确定灰度值，也可以在选定的模板上亚像素地定位目标点的位置。应从目标特征较明显、稳定、受污染少的实际图像中选取模板。对于立体图像匹配，可取左右任意一幅图像；对于图像序列，可以取第一帧图像或当前图像的前一帧图像等。用此模板对包含待定特征目标点的其它图像区域进行相关运算、定位。

这种模板选取方法可真实地反映实际目标特性，对任意图像目标都适用，特别适合那些无法建立理想模板的图像任意目标。但同时由于实际图像中有噪声的影响，因此对有明显噪声的目标模板，可先用对目标特征不产生畸变的滤波，如旋滤波、SUSAN 滤波等对模板进行去噪声滤波。由于模板直接取自于实际图像，此方法具有简单方便，适用于任意特征目标的特点，在工程中比理想模板有更广泛的应用。

4.4.2 相关法的几种数学形式^[12]

(1) 直接相关

相关函数为

$$C(x, y) = \sum_{(i, j) \in W} f(x+i, y+j)g(i, j) \quad (4.4.2)$$

其中 $f(x, y)$ 为目标所在的图像， $g(i, j)$ 为目标模板， W 为模板区域。

当 $f(x, y)$ 和 $g(i, j)$ 确定后，两者在空间和灰度上的重叠度或相似度越大，则 $C(x, y)$ 值越大。因此通过确定相关函数的最大值位置就可以确定模板目标在 $f(x, y)$ 上的位置。

(2) 协方差（均值归一化）相关

相关函数为

$$C(x, y) = \sum_{(i, j) \in W} [f(x+i, y+j) - f_m][g(i, j) - g_m] \quad (4.4.3)$$

其中 f_m 与 g_m 分别是 $f(x, y)$ 与 $g(i, j)$ 在各自相关窗口的平均值。协方差相关在相关公式中将两个函数减去各自窗口的灰度均值，也称为减掉背景的相关运算。

由于从相关公式中减去各自窗口的灰度均值，从频谱分析角度，相当于去掉了直流分量信号。因此当相关的两个目标的灰度特征分布一致，但是背景灰度值相差一个常数时，应用协方差相关法会明显提高相关函数峰顶尖锐程度，这样有利于提高定位精度。对于搜索区域中相关窗口内的灰度值方差较小，但是灰度平均值（即背景）比较大的情况，如果用直接相关法，得到的相关函数值在整个搜索区域都比较大，最大值点不明显。而采用协方差相关法，得到的相关函数值会呈现明显的单峰分布，因此协方差相关法有

助于消除虚假的相关峰值。

另外协方差相关还有抗灰度反转的性质。由于在相关公式中减去了各自相关窗口的平均值，因此这时相关函数值的范围扩大到了 $[-C_{\max}, C_{\max}]$ 。当两个目标是灰度取反的关系时，相关函数值等于 $-C_{\max}$ 。这种性质使得均值归一化相关具有抗灰度反转能力。这种特性可以用在航空负片图像等的目标匹配和定位中。

(3) 标准化相关

相关函数为

$$C(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in W} f(x+i, y+j)g(i, j)}{\sqrt{\sum_{(i, j) \in W} f^2(x+i, y+j) \sum_{(i, j) \in W} g^2(i, j)}} \quad (4.4.4)$$

标准化相关法用相关窗口内灰度平方和来对直接相关法得到的相关系数作归一化，使得相关函数的取值范围为 $[0, 1]$ 。通过相关函数最大值，可以确定两函数的相似程度。当两函数确有相同特征时，相关函数最大值通常应大于 0.8，甚至可达 1。当最大相关函数值小于 0.5 时，可认为搜索到的目标是可疑的，或目标受到了较大的干扰。因而此标准化相关法不但定出了目标的位置，而且给出了目标的可信度。

两个函数的互相关函数的定义有多种形式，它们的物理意义虽然相同，但是度量的范围和性质却有所不同。为了讨论和使用的方便，通常我们将作了归一化的相关函数值称为相关系数，其取值范围为 $[0, 1]$ 或 $[-1, 1]$ 。

(4) 标准化协方差相关（方差归一化相关法）

相关函数为

$$C(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in W} [f(x+i, y+j) - f_m][g(i, j) - g_m]}{\sqrt{\sum_{(i, j) \in W} [f(x+i, y+j) - f_m]^2 \sum_{(i, j) \in W} [g(i, j) - g_m]^2}} \quad (4.4.5)$$

标准化协方差相关函数是利用两个相关函数的均方差来对协方差相关函数进行归一化，其取值范围为 $[-1, 1]$ ，当两函数完全一致时，相关系数为 1；完全不一致时，相关系数为 0；完全相反时，相关系数为 -1。

由于方差归一化相关法是标准化的协方差函数 因此具有对灰度线性变换的不变性。证明如下。设对目标图像 $f(x, y)$ 的灰度作如下的线性变换。

$$f'(x, y) = af(x, y) + b \quad (4.4.6)$$

则用模板 $g(x, y)$ 对线性变换后的图像 $f'(x, y)$ 作相关运算所得的相关系数为

$$\begin{aligned}
C'(x, y) &= \frac{\sum_{(i,j) \in W} [af(x+i, y+j) + b - af_m - b][g(i, j) - g_m]}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in W} [af(x+i, y+j) + b - af_m + b]^2 \sum_{(i,j) \in W} [g(i, j) - g_m]^2}} \\
&= \frac{a \sum_{(i,j) \in W} [f(x+i, y+j) - f_m][g(i, j) - g_m]}{a \sqrt{\sum_{(i,j) \in W} [f(x+i, y+j) - f_m]^2 \sum_{(i,j) \in W} [g(i, j) - g_m]^2}} = C(x, y)
\end{aligned} \tag{4.4.7}$$

所以，对于目标和模板图像之间存在线性畸变的情况，方差归一化相关法仍然能较好地评价它们之间的相似程度。这种相关法能起到突出特征变化的效果，使得相关系数矩阵呈明显的单峰分布，并且峰顶形状更尖锐，而且同协方差相关法一样具有抗灰度反转能力。因此这种相关法在实际中应用较多。

(5) 差平方和法

相关函数为

$$C(x, y) = \sum_{(i,j) \in W} [f(x+i, y+j) - g(i, j)]^2 = C_0 - \sum_{(i,j) \in W} f(x+i, y+j)g(i, j) \tag{4.4.8}$$

其中 $C_0 = \sum_{(i,j) \in W} [f^2(x+i, y+j) - g^2(i, j)]$ 。

差平方和法又称为最小二乘相关法，差平方和法的物理意义是考察目标模板与目标图像之间差异的平方和，当两个目标完全重合时，应没有差异，即以此相关函数最小值点为目标的定位点。差平方和法与直接相关法的物理出发点不同，但其数学表示形式可以化成近似一致，即两者的数学物理内涵是相同的。 C_0 在模板上和给定区域可近似为一常数，因此求相关函数的极大值问题就可以转化为求解极小值问题。可以说两种方法是基本等价的。

(6) 差绝对值和法

与差平方和法的原理类似，可以用模板与目标图像灰度差的绝对值之和代替上面的差平方和：

$$C(x, y) = \sum_{(i,j) \in W} |f(x+i, y+j) - g(i, j)| \tag{4.4.9}$$

由于差绝对值和法避免了平方运算，因此相对于差平方和法减少了计算量。差绝对值和法以最小值点为目标的定位点。此式已不是原相关运算的数学意义，但与相关运算有着类似的结果。

(7) 相关函数的选取

在对目标图像作相关运算提取定位特征目标时，首先要估计目标点的大致区域，即

确定搜索区；然后对此搜索区域中的每个点在与模板尺寸一致的区域上做相关运算，即在每个点都得到一个相关函数值结果；最后选取相关函数值最大点的位置为目标的整像素定位点。由于数字相关运算的数学含义是用模板对目标搜索区作卷积，相当于一个低通滤波器，模板窗口中大量的点之间作乘积后求和具有很好的抑制噪声作用。从实际计算结果可看到，相关函数分布的光滑程度比原始图像的光滑程度要好得多，通常对噪声不敏感，因此相关定位算法具有良好的抗噪声能力。在实际应用中采用哪种相关函数公式应视应用的要求和条件而定。对既需要确定最大相关位置，又需要知道相关程度的应用，通常采用标准化相关法和标准化协方差相关法；而对只要求确定最大相关位置，又希望计算速度快的应用，常选用直接相关法或差绝对值和法等。

4.4.3 相关法的亚像素定位技术

前面介绍的数字相关法将具有最大相关系数的像素点作为定位点，只能将目标定位到整像素位置。下面介绍进一步确定亚像素定位结果的的两种方法：亚像素步长相关法和相关系数拟合极值法。

(1) 亚像素步长相关法^[13]

在确定了目标的整像素位置即粗定位后，由于实际目标位置点不一定在整像素点上，因此为了进一步提高目标定位的精度，可以对以目标整像素粗定位位置为中心的一个小区域采用亚像素步长进行相关精定位。以标准化相关法为例，亚像素步长相关算法公式如下

$$C(x + mdx, y + ndy) = \frac{\sum_{(i,j) \in W} f(x + mdx + i, y + ndy + j)g(i, j)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in W} f^2(x + mdx + i, y + ndy + j) \sum_{(i,j) \in W} g^2(i, j)}} \quad (4.4.10)$$

其中 dx , dy 为 x 和 y 方向上的亚像素步长， m 和 n 为整数。

非整数像素点上的灰度值可以用插值方法来获取，为了减少计算量，一般采用如下双线性插值来进行

$$I(\alpha, \beta) = I_{00}(1 - \alpha)(1 - \beta) + I_{01}\alpha(1 - \beta) + I_{10}(1 - \alpha)\beta + I_{11}\alpha\beta \quad (4.4.11)$$

其中 I_{00} , I_{01} , I_{10} 和 I_{11} 为待插值点所处方格的四个顶点， $\alpha=mdx$, $\beta=ndy$ 为插值点在如图 4.4.2 所示的 α - β 坐标系下的坐标值。实际也可以采用其它形式的二维插值。

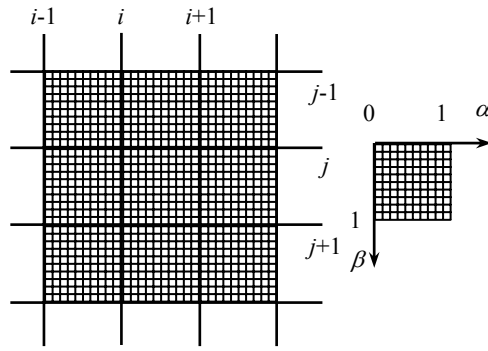


图 4.4.2 亚像素步长相关示意图

如果能对目标图像进行理想插值，那理论上相关定位的精度取决于步长的大小。但是由于图像中噪声和插值算法的误差影响，步长小到一定程度后，继续减小步长对提高定位精度是没有意义的。实验表明 dx 和 dy 取 0.1~0.01 像素即可。在理想的情况下，这种亚像素相关定位的精度为 0.02~0.1 像素。

(2) 相关函数拟合极值法

由于相关函数矩阵的分布通常是在以最大值为中心的单峰分布，并且在此区域上相关函数通常近似地满足高斯分布，因此可以通过拟合方法得到该区域相关函数的解析曲面函数，取曲面极值点为目标的亚像素位置。

一般常用的拟合方法有高斯函数拟合和二维多项式拟合。对于相关函数曲面比较平缓的情况，高斯拟合不仅需要较大的拟合窗口，而且可能产生较大的误差。因此实际中多采用如下的二元二次多项式即抛物面来拟合相关函数曲面。

$$f = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (4.4.12)$$

曲面的极值点位置为

$$x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, \quad y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \quad (4.4.13)$$

实际拟合窗口的大小取 3×3 或 5×5 比较合适。前面提到，相关运算是一种很好的抑制噪声过程，对噪声不敏感，相关系数分布通常是光滑的。上述曲面拟合精度较高。在理想情况下，这种亚像素相关定位的精度为 0.01 ~ 0.1 像素。

根据实际实验可得到下面的结论：在图像信噪比较大的条件下，相关函数拟合极值法的精度和亚像素步长相关法精度大致相同；但在图像信噪比较小的情况下，相关函数曲面拟合法能获得较好的定位精度。这是因为拟合法具有良好的抗噪声能力。

另外当模板尺寸较大时，亚像素步长相关法的计算量要增加许多，因而需要采用一

些措施来减少亚像素步长相关法的计算量。相比之下，相关函数拟合法具有抗噪声能力较高、适应性好和计算量小等优点，因此推荐使用相关函数拟合法来进行亚像素目标定位。

4.4.4 提高相关定位精度的措施

从相关系数矩阵来看，主要有两个因素影响相关定位精度，即高斯函数的均方差 σ 要小，使高斯峰尽量陡峭；高斯函数的峰值要大，尽量接近于 1。当目标信号中高频分量较少时，则高斯函数的均方差 σ 较大，即相关函数曲线比较平缓；而当目标信号中高频分量较多时，则 σ 较小，即相关函数曲线比较陡峭。模板与目标图像特征符合得较好，则高斯函数的峰值接近于 1；反之，高斯分布的峰值较小。下面从这两方面讨论提高相关定位精度的措施。

(1) 增加源图像目标特征的高频信息

在采集图像时，采取选用合适的摄像机镜头，调整好环境光场等措施来获得清晰度、对比度较好的图像。最重要的是使目标特征的高频分量幅值要大。

1) 增加目标特征的灰度分布梯度

可以从数学上证明：特征的灰度分布梯度越大、越尖锐，相关函数的高斯分布就越陡峭，用于定位就越敏感；反之，灰度梯度越小，则相关函数的高斯分布越平缓，相关函数越不敏感。很容易想象，对一个完全平坦区域，相关函数处处相等，则无定位精度可言。另外，灰度分布梯度大的目标通常有更多的信息量，在同等噪声水平下信噪比较大。并且灰度分布梯度大的目标，在相关窗口内灰度的均方差较大，即均方差归一化相关函数式(4.4.5)中的分母值较大，因而相关函数对图像噪声影响不敏感。因此对均方差归一化相关函数，虽然提高特征灰度梯度不一定提高相关系数，但仍然对提高定位精度和稳定性有重要帮助。

2) 提高目标图像的对比度、清晰度

由于上述灰度梯度要大的要求，可自然推出目标图像的对比度、清晰度要好的结论。因此实际采集原始图像时，应调整好光场，以得到最佳的对比度，或目标灰度动态范围。同时光学成像系统的点扩展函数应尽可能小，以减小图像模糊效应，突出高频成份，达到最佳的图像清晰度。

3) 滤除噪声提高信噪比

在具体实施亚像素定位之前，根据所采用的亚像素定位算法和实际图像的目标与背景的实际情况，通常先对图像进行预处理，以提高亚像素定位算法的适应性和精度。滤

除噪声以提高图像信噪比是预处理的重要内容。

图像噪声可以区分为背景噪声和随机噪声。背景噪声主要是由背景、环境照明的不均匀、从图像介质进行重采样等引起的噪声和电子噪声等，它对许多亚像素定位算法的精度会产生不良的影响。如图 4.4.3 所示，变化较大的背景光强会与目标灰度分布叠加，使原来目标中心的顶部发生偏移，产生系统误差。因此应该尽量先做消除背景噪声的预处理。当背景噪声难以抑制时，应选取对背景噪声不敏感的亚像素定位算法。

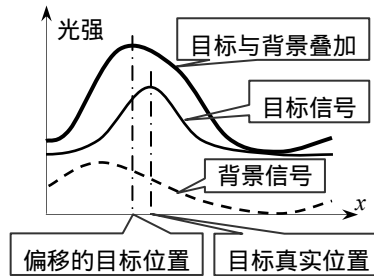


图 4.4.3 背景光强变化使图像目标中心发生偏移

随机噪声也会对亚像素定位算法的精度产生不利影响，应在图像的采集、传输等过程尽量提高图像的质量，抑制噪声水平。而用各种数字滤波器对图像进行滤波必须十分慎重，因为数字滤波（特别是非线性滤波器）过程本身会对目标特征造成一定畸变。当噪声水平较低时，这种畸变可能会大于噪声的影响；当噪声水平很高时，滤波通常能够改善定位精度。为此应选择合适的滤波算法，既要滤除噪声，又要保持目标的结构特性不被破坏。在此推荐两种符合上述要求的滤波算法：SUSAN 滤波和作者提出的旋滤波^[14-16]。这两种滤波既可以有效地消除噪声，同时又保持、甚至锐化目标的边界和角点等特征。旋滤波主要对条纹图和有方向特征的目标有效，第十一章将作进一步介绍。

(2) 提高模板与目标的相似性

1) 提高模板与目标的相似性

选用模板的特征应尽量与图像的特征一致。但由于实际目标图像会有随机噪声干扰，这里说的特征一致是指无噪声的理想目标特征。在特征非常清楚的情况下，也可以在模板中强化特征，例如图 4.4.4(a)中实线为实际图像特征，虚线是模板。此模板可得到与原图模板一致的定位结果，但其最大相关系数值更大，便于检测。

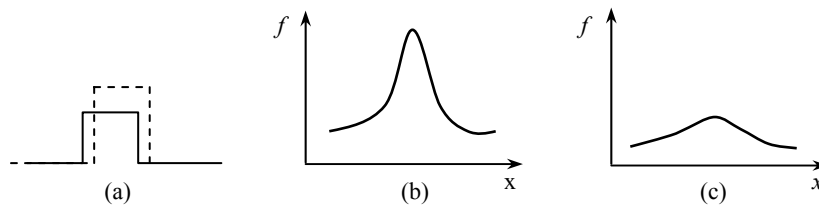


图 4.4.4 影响相关精度的因素

2) 使模板尺寸与目标特征尺寸大致相同

目标特征尺寸与模板尺寸的比例对相关运算也有较大的影响。可以想象，如果模板尺寸很大，而目标特征尺寸很小，则目标特征对整个相关运算的贡献很小。反之如果模板尺寸小，目标特征尺寸大，模板尺寸内不能较完全地反映目标的特征，则不但会使定位精度降低，甚至可能会出现错误定位的情况。研究表明，模板尺寸与特征尺寸之比为 1~2 时，可得到最佳的相关结果。例如，目标是 3×3 像素点左右的光团，则模板取 3×3 或 5×5 个像素点的窗口即可。目标为 15×15 像素的“十”字丝时，模板取 15×15 至 21×21 个像素点的窗口即可。过大的模板尺寸不但会降低对目标特征的敏感性，而且大大增加了计算量。当目标特征本身有丰富的灰度变化时，模板尺寸可取与特征尺寸一致，无需更大。

当上述各个因素都较好的满足时，相关系数阵中的高斯分布峰值会较高，标准相关系数接近 1，并且高斯峰较陡，即高斯分布的 σ 较小，反之亦然。如图 4.4.4 (b) 是上述几个因素满足较好时的相关系数分布图，图 4.4.4 (c) 是上述几个因素满足不好时的相关系数分布图。对于图 4.4.4 (b) 的情况，可以较容易地得到较好的定位精度，搜索的区域也可以小些。而对图 4.4.4 (c) 的情况，定位精度将明显下降，特别是用亚像素步长相关法时，平缓的峰部易受噪声的干扰，而影响定位精度。

3) 选择合适的模板确定方式

选用模板的特征应尽量与图像目标特征一致。模板的选取主要有三种方式：一是从原目标图像上直接获得，二是利用数学模型建立理想模板，三是前两种的结合。模板尺寸的选取应该是特征目标的 1~2 倍。同时兼顾计算量等的要求。

采用第一种方法获取模板，首先要注意初始目标定位要准确；其次模板选取应以目标点为中心，可减小计算量。如果目标点不在整像素位置，应采用插值方法获取亚像素的位置和灰度值；最后可对模板图像进行滤除噪声处理。

同时，对于图像序列相关跟踪过程中，用前一帧的目标模板对后一帧图像进行相关的情况要注意一点：各次相关定位可能有误差积累，会产生目标漂移，以至于最后产生错误的结果。因此在实际中应对这种情况采取一定的措施：如隔一定帧数对目标用其它方法再定位，然后重新选取模板，或者隔一定帧数更换一次模板。

采用数学模型建立理想模板的方法，具有一定的局限性，只能用于可以用一定数学模型来描述的图像目标。例如满足高斯分布的点目标，网格图像的“十字形”节点和矩形角点等目标。数学模型描述的理想目标特征一定要尽量与实际图像目标相符合，具体的

模板制作方法可参见 4.5 节关于仿真图制作的内容。

如果采取适当的措施，得到的相关系数矩阵就会具有较好的单峰分布，而且峰顶形状更尖锐，能获得比较高的相关定位精度。因此在相关定位法中，提高精度的最重要的环节是选用尽量高标准地满足以上各因素要求的模板。

4.4.5 提高相关运算的速度^[13]

相关定位法的主要弱点之一是运算量大。上述的相关法仅仅考虑了满足刚体条件的物体沿 x 方向和 y 方向的简单平移 u 和 v ，如果考虑到目标的转动、伸缩和变形等情况，则相关运算的参数变为六个，即 $(u, v, \partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial v/\partial x, \partial v/\partial y)$ ，此时搜索成为六维搜索，计算量将极大增加。另外若采用亚像素步长来提高相关精度，计算量还要增加一或两个量级以上。因此许多学者在研究多种减少相关法的计算量、提高运算速度的办法。减少计算量可以从改进算法和软件程序优化两个方面入手，本节主要讨论算法方面的改进措施，常用的主要途径有以下几种。

(1) 利用模板目标特性来减少数据量

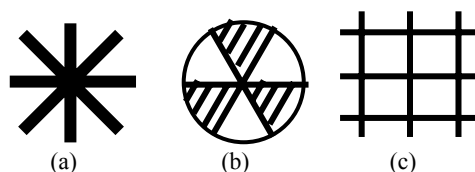


图 4.4.5 相关模板类型

在保证模板目标灰度方差最大（模板目标的高频分量比例较大），相关精度不变的前提下，对不同特征的模板采用恰当的形式来减少参加相关的数据量。例如对具有对称特性的模板，如高斯光团目标，模板数据可以只在“米”字线，甚至是“十”字线上进行相关，如图 4.4.5(a)所示。图 4.4.5(b)是一个六等分黑白相间的扇形圆结构，如果只关心目标的旋转量，取目标外侧的一个圆环作为相关的模板，可在保持较好相关精度的同时大大减少计算量。但这时由于数据信息量减小，算法的抗噪声能力会有所下降。

对于如图 4.4.5(c)所示的十字形网格节点的情况，由于目标特性是已知的，因此只要在低灰度值的网格十字形臂上作相关运算就可以对目标定位。因此可以通过二值化及图像理解的方法大致确定目标点的一个小搜索区域，这样避免了全场相关，减少了相关的计算量。

(2) 粗-细（金字塔）搜索法

为了减少计算量，可以先对目标在低分辨率的图像上进行粗略定位，然后逐步在高分辨率的图像上进行精确定位，直至在最高分辨率的图像上达到所需相关精度为止。常

用的方式是：对原始图像的一个 $n \times n$ （如 2×2 或 3×3 ）区域进行平均得到一个像素，从而压缩 n 倍形成第二级图像，再在第二级图像上压缩构成第三级图像，依此类推。实际中也可以用其它的压缩策略。做相关运算时，首先在比较小的图像上定出目标的粗略位置，然后再在尺寸大一级的图像上较精确地定位，最后在原始图像上相关定位（注意相关的模板也要做相应的缩小放大处理）。由于粗定位后，下一级搜索通常只需要在压缩倍率 $n \times n$ 的窗口内进行，计算量大大减小。这样就实现了由粗到细的相关搜索定位。由于这些图像叠置起来很像古埃及的金字塔，因此这种相关算法又称金字塔搜索法。金字塔搜索法是一种常用、通用的搜索法，在许多领域都有应用。

粗-细搜索法的另一种算法形式是：先对整个搜索区域采用大步长进行相关运算，找到极大值点后，以此极大值点为中心缩小相关搜索区域和步长，再进行相关运算。重复上述过程，直到在最小步长的相关系数矩阵中确定极大值点。这种策略只在整个区域的相关系数矩阵为单峰分布时才适用。

(3) 利用数学规划的原理和方法提高计算速度

对于在相关区域相关系数成单峰分布的情况，上述相关定位法相当于求解一个无约束最优化问题

$$\max_{(x,y) \in W} C(x,y) \quad (4.4.14)$$

无约束最优化问题的求解方法分为两类：解析法和直接法。其中解析法包括梯度法，共轭梯度法，牛顿法和变尺度法等；直接法包括坐标轮换法，步长加速法，方向加速法和单纯形法等。由于解析法要利用到目标函数的梯度信息，因此容易受到图像噪声的影响而产生错误。直接法仅仅涉及到目标函数的计算，并不涉及目标函数导数等解析性质，而且具有构思直观、使用方便和效果稳定等特点，因此实际中更多地采用直接法。

下面介绍两种常用的方法：梯度法（爬山搜索法）和坐标轮换法。

1) 梯度法^[13]

单调函数沿着正梯度方向上升最快，这类似于沿坡度最大的方向爬山速度最快，这是梯度法（又称为爬山搜索法）的基本原理，如图 4.4.6 所示。

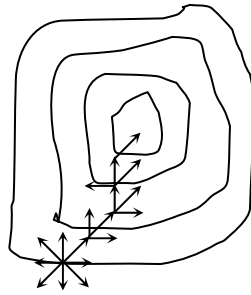


图 4.4.6 梯度法示意图

具体的梯度法步骤为：

- i. 给定一个初始搜索点并计算该点的相关系数；
- ii. 给定搜索步长，依次计算以当前点为中心的八个方向邻近点的相关系数，找出与当前点相关系数相比增量最大点及其方向，并以此方向作为当前搜索方向；
- iii. 在搜索过程中，首先比较当前搜索方向上的点和其两个相邻方向上的点的相关系数，如果当前方向点的相关系数最大，则以该方向的下一点作为当前点，继续沿这个方向搜索峰顶。如果当前方向点的相关系数不是最大，则考察其相邻点，直至找到局部相关系数最大点方向，再沿此方向前进。重复此过程向前推进；
- iv. 在上述搜索过程中，如果所有相邻点的相关系数均小于当前点，则缩小步长，直至步长减少到一个像素为止，对于相关系数单峰分布的情况，此点即为相关定位点。

梯度法的收敛速度比较慢，这是因为只利用了局部的梯度信息，而不是函数整体的梯度信息，同时梯度法逼近极值点的路线是锯齿形的，并且越靠近极值点，收敛速度越慢。另外对于实际图像噪声大或搜索步长选择不合适等情况，梯度法可能获得错误的定位结果。因此实际中应采取措施，来提高梯度法的收敛速度和可靠性。为了获得更高的定位精度，可以用前面的亚像素步长相关法或相关系数拟合极值法来获得亚像素的定位精度。

2) 坐标轮换法

对于多个自变量的情况，可以采用沿不同坐标轴轮换优化的方法。例如计算 6 个参数的相关时，首先改变 u, v ，其余 4 个参数保持不变。找到使相关系数最大的 u, v 值后，再变化另外两个参数 $\partial u/\partial x, \partial v/\partial y$ ，其余 4 个参数保持不变，当找到使相关系数最大的 $\partial u/\partial x, \partial v/\partial y$ 值时，对最后的两个参数 $\partial u/\partial y, \partial v/\partial x$ 也进行类似的处理。

第一轮相关结束后，为了提高相关精度可以进行多次相关，直至整个双参数相邻两次相关系数变化小于一个指定阈值为止。对于双参数 u, v 相关的情况(如图 4.4.7 所示)，这种方法也称为十字搜索法。坐标轮换法可以较大幅度地减少相关计算量。它同样只适

用于整个区域的相关系数矩阵为单峰分布的情况。

除上述算法外，实际常用优化搜索策略和算法还有松弛法、模拟退火法、神经网络和进化算法等。

4.5 定位算法性能评价仿真图的制作

在摄像测量与光测数字图像处理中，衡量各种处理算法优劣的指标主要有两个：可靠性和精度。衡量和评价算法优劣的常用方法有标准参考物检验法和仿真图像检验法两种。

标准参考物检验法首先拍摄空间已知各种几何或运动参数的参考物体的图像，然后用待考核的算法提取、测量这些几何或运动参数，将所测的结果与实际值比较，以此来检验算法的可靠性和精度。但是受到标准参考物制作难度，实验条件和环境光场等因素的限制，标准参考物检验法有时难以实施，而且经常不能完全反映实际可能遇到的各种情况。因此这种方法通常作为最后验证用。

目前国际上常用的检验方法是仿真图像检验法，即用数学仿真图像来验证算法和程序的可靠性和精度。对各种亚像素定位算法，用仿真图检验算法精度通常是一种必要的手段和环节。

用仿真图来评价算法性能的原理是，仿真图中目标的位置是设定的，即目标位置的真值已知，因此可以用来考核算法定位精度。制作多幅目标处于不同位置的仿真图，并且加入不同强度的噪声。然后用待评价的算法对仿真图中目标进行定位，分别检验在无噪声和有不同强度噪声的条件下，算法定位与目标位置真值的差，由此确定算法的正确性、可靠性和精度。

通常用无噪声的仿真图来检验算法和程序的正确性。当实测结果与已知参数符合比较好时（可用定位误差的均方差来衡量），说明算法或程序是正确的；反之，说明算法或程序有错误。

然后用带不同强度噪声的仿真图来检验算法和程序的健壮性（也称为鲁棒性），即算法的抗噪声性能。对一系列仿真图加入不同强度的噪声，用待评价算法对此仿真图目标进行定位，统计实测定位结果和已知真值的差值的均方差，以此均方差作为算法在一定强度噪声条件下的定位精度。如果对仿真图像加入较高强度的噪声，算法仍能获得较好的定位精度，则说明算法有较好的抗噪声性能；反之，则表明算法抗噪声性能较差。在考察算法对不同强度噪声图像的定位精度后，对于实际图像，只要估计出图像噪声的强度，就可以大致确定算法对实际目标定位的精度。

4.5.1 仿真图生成原理

数字图像是对空间光学图像的离散描述，图像用离散的灰度值反映了空间物体的光学特性，而用像素的排列位置来反映物体的位置。根据这些光学特性和位置信息，通过图像处理分析可以得到物体的各种特征，如位置、尺寸大小、表面曲率和姿态角度等信息。如果已知空间物体特征、方位和尺寸等参数，就可以根据理想成像规律，利用数学仿真手段来生成一幅描述空间物体的仿真图像。

一幅空间连续图像可用二维光强度函数 $f(x,y)$ 来描述。理想的离散数字图像 $I(i,j)$ 的数字化过程可用下式来描述

$$I(i, j) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) h(x_0 + i\Delta x - x, y_0 + j\Delta y - y) dx dy \quad (4.5.1)$$

其中 Δx 和 Δy 为采样的间隔，也表示采样窗口宽度和高度， $h(x,y)$ 为理想采样函数，数学表示为

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta x \Delta y} & , \quad |x| \leq \Delta x / 2, |y| \leq \Delta y / 2 \\ 0 & , \quad elsewhere \end{cases} \quad (4.5.2)$$

实际成像的采样过程都需要一定的采样口径来保证曝光强度，具有灰度平均效应。如果函数 $f(x,y)$ 的形式比较复杂，采用这种方法来生成仿真图像增加了计算的复杂性，不容易编程实现。因此实际中常采用理想脉冲函数采样来实现仿真图的生成。令 Δx 和 Δy 趋近于零，则式(4.5.1)变为

$$I(i, j) = f(x_0 + i\Delta x, y_0 + j\Delta y) \quad (4.5.3)$$

采用上式生成仿真图，具有计算简单、容易编程实现的优点，但无法模拟由于有限采样口径带来的灰度平均误差。可以通过加入随机噪声的方法来模拟这种灰度平均误差。

4.5.2 仿真图制作方法实例

本节对常用的目标（点、直线、曲线、椭圆等）仿真图像的制作方法作简要的介绍。

(1) 圆标志仿真图像

一个完全理想的圆标志可用下式来生成，其形状如图 4.5.1(a)所示。

$$G(x, y) = \begin{cases} 125 & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} > R \\ 255 & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq R \end{cases} \quad (4.5.4)$$

其中 (x_0, y_0) 是圆心坐标， R 是圆半径。当 R 趋近于零时，上式就变为二维迪拉克广义函数(或理想脉冲函数)。如果选取高斯函数为成像系统的扩展函数，则圆标志、光团

目标就可表示为

$$G(x, y) = Ce^{-[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2]/R^2} + B \quad (4.5.5)$$

其中 (x_0, y_0) 是圆心坐标， C 为高斯点的幅值大小， B 为背景灰度值，图 4.5.1 (b)为高斯点的三维示意图。为了仿真过度曝光的情况，可以增大 C 或 B 的值，超过灰度最大值的函数值被截平。如图 4.5.1 (c)所示的顶部为平面，周围满足高斯分布的圆台目标。

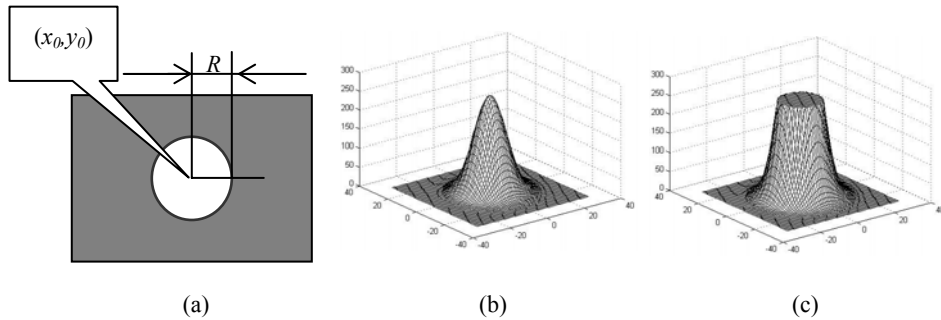


图 4.5.1 仿真圆标志示意图

(2) 解析曲线仿真图像

这里的解析曲线是指能用解析表达式来描述的曲线，包括直线、圆、椭圆等。理想的解析曲线是没有宽度的，但是实际中的各类线都是有宽度的。设解析曲线横截面亮度分布函数 $L(x)$ 为

$$L(x) = \begin{cases} B + C & |x| \leq w/2 \\ B & |x| > w/2 \end{cases} \quad (4.5.6)$$

其中 C 为幅值大小、 B 为背景灰度值， w 是线的宽度。设成像系统点扩展函数为 $h(x)$ ，则实际图像中曲线横截面亮度分布函数 $L'(x)$ 为

$$L'(x) = L(x) * h(x) \quad (4.5.7)$$

如图 4.5.2 中实线和虚线分别表示函数 $L(x)$ 和 $L'(x)$ 。

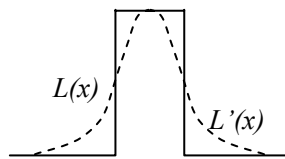


图 4.5.2 解析曲线截面灰度分布

当 w 趋近于零时，有

$$L'(x) = \delta(x) * h(x) = h(x) \quad (4.5.8)$$

其中 $\delta(x)$ 为理想脉冲函数。一般点扩展函数可以用高斯函数或指数函数表示。则曲线横截面灰度分布函数为：

$$L'(x) = C \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) + B \quad (4.5.9)$$

其中 σ 为高斯函数的方差，用来控制线的宽度。如果将该截面沿解析曲线运动，就可以生成仿真图像。

为了减少计算量，实际中往往采用这样的方法：首先计算离散整像素点到曲线的距离，然后用式(4.5.9)来计算该点的灰度值。对于包含曲线的区域中的每个像素点采用上面的方法计算灰度值，就生成了仿真图像。图 4.5.3(a)和(b)分别为仿真的直线和椭圆图像。

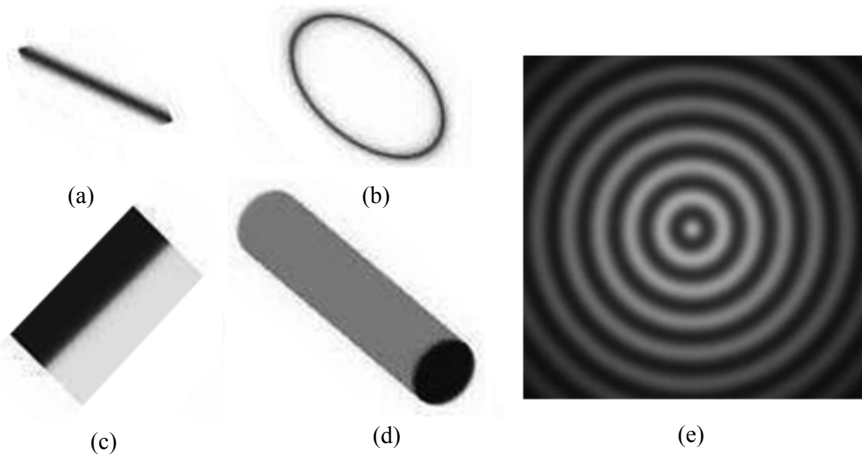


图 4.5.3 解析曲线、干涉条纹仿真图实例

对于图像中的理想边缘，其横截面灰度分布函数取决于所选取的点扩展函数。如果选取式(4.3.20)的点扩展函数，则边缘横截面灰度分布函数为

$$L'(x) = \begin{cases} 1 - e^{-sx} / 2 & x \geq 0 \\ e^{sx} / 2 & x < 0 \end{cases} \quad (4.5.10)$$

其中参数 s 用来控制边缘的突变程度，图 4.5.4 是不同 s 值对应的横截面亮度分布函数曲线。图 4.5.3(c)和是按照上面方法生成的边缘仿真图像。

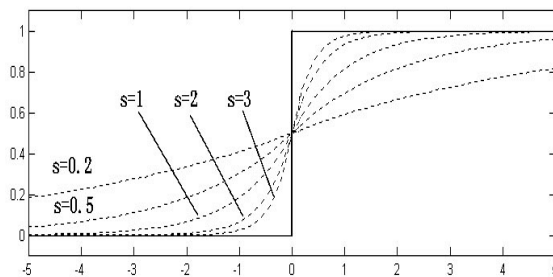


图 4.5.4 不同突变程度的斜坡边缘灰度分布图

对于其它类型目标，如角点的仿真图像制作，只要知道空间的任意物体的函数表示形式，就可以依照这种方法的原理对其进行仿真生成。如图 4.5.3(d)为一个不考虑光照的空间圆柱体仿真图像。

(3) 干涉条纹图的仿真图像

本书第十一章将介绍干涉条纹图的处理。在检验干涉条纹图处理方法时，可以制作仿真条纹图。它由条纹的背景、幅值和相位场来确定。下面给出一个背景、幅值和条纹密度均变化的圆环形条纹仿真图的生成公式：

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos(\varphi(x, y)) \\ &= B \exp[-(r/t_1)^2] + C \exp[-(r/t_2)^2] \cos(pr) \end{aligned} \quad (4.5.11)$$

其中 B 为图像中心的灰度值， C 为图像中心条纹幅值，参数 p 控制条纹密度， r 是图像上任一点到图像中心的以像素为单位的距离， t_1 、 t_2 分别是用来控制背景和条纹幅值变化的参数。选取参数 $B = 128$ ， $C = 60$ ， $p = \pi/10$ ， $t_1 = t_2 = 128$ ，便可以得到如图 4.5.3(e) 所示的仿真条纹灰度图。

(4) 空间三维物体的仿真图像

上面的例子都是给出目标在图像上的仿真公式，即所有仿真参数都是图像坐标上的参数。这对仅确定图像上二维目标的测量效果是足够的。但是对许多涉及三维综合测量的情况，最终验证的结果参数是三维空间中的位置、姿态、尺寸和其它特征。此时，仿真的原始参数应是三维空间中的目标物体参数，然后再根据中心透视成像原理和给定的摄像系统的参数，制作多幅不同角度拍照的相应的二维仿真图像或仿真数据。对这些图像用待评测的三维测量算法进行二维信息提取和三维解算，将得到的目标参数与仿真真值比较，可以得到算法的精度。

例如要制作一个空间椭圆的图像，首先需给定空间椭圆方程的参数，包括椭圆中心，长、短轴，椭圆法向矢量；然后确定摄像系统的光心坐标，光轴角度、焦距、图像主点等参数，最后根据成像原理仿真得到空间椭圆的二维图像。这里给出摄像机标定仿真试验中理想参考物成像的仿真结果。标定参考物为如图 4.5.5(a)所示的空间立体网格，图 4.5.5(b)和(c)分别是仿真生成的左右摄像机拍摄到的图像。

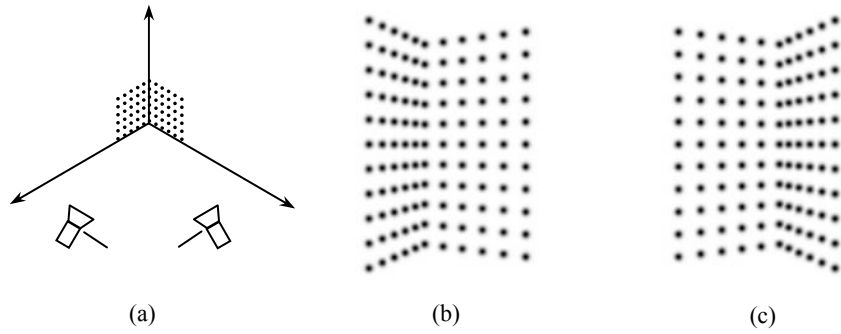


图 4.5.5 空间立体网格仿真图像

4.5.3 噪声仿真生成

为了衡量各种摄像测量算法的抗噪声性能，即鲁棒性或健壮性，需要在仿真图中加入不同程度的噪声。图像中最常见的噪声是高斯分布随机噪声和脉冲（盐与胡椒）噪声。

由于可以通过对均匀分布随机噪声进行变换来生成其它类型的随机噪声，因此下面分别介绍均匀分布噪声，高斯噪声和脉冲噪声的仿真生成方法。

(1) 均匀分布噪声的仿真生成

在区间(0,1)上服从均匀分布的随机噪声可近似由下式产生

$$U_k = [\text{rand}() + 1] / (\text{RAND_MAX} + 2) \quad (4.5.12)$$

其中 $\text{rand}()$ 为随机数产生函数， RAND_MAX 为 $\text{rand}()$ 所取的最大值。随机变量序列 U_k 的数学期望 $E(U_k) = 1/2$ ，方差 $D(U_k) = 1/12$ 。

要获得在区间(a, b)均匀分布的噪声，作如下式的线性变换即可。

$$U'_k = a + (b - a)U_k \quad (4.5.13)$$

(2) 高斯分布噪声仿真

第一章中已经提及，高斯分布的随机噪声在实际图像中是大量存在的。常用的高斯噪声仿真方法有近似法和函数变换法两种^[17, 18]。

1) 近似法

由概率论中的中心极限定理可知：设 n 个随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立，服从同一分布，且具有数学期望和方差： $E(X_k) = \mu$ ， $D(X_k) = \sigma^2 \neq 0$ ($k=1, 2, \dots$)，则随机变量

$$Y_n = \left(\sum_{k=1}^n X_k - E\left(\sum_{k=1}^n X_k\right) \right) / \sqrt{D\left(\sum_{k=1}^n X_k\right)} = \left(\sum_{k=1}^n X_k - n\mu \right) / \sqrt{n\sigma} \quad (4.5.14)$$

近似服从均值为 0、方差为 1 的标准正态分布，而 $\sum_{k=1}^n X_k$ 近似服从均值为 $n\mu$ 、方差

为 $\sqrt{n}\sigma$ 的正态分布。 n 值越大，上述分布近似高斯分布的程度越好，通常认为当 $n = 12$ 时，就可得到较好近似的正态分布。为了计算上的方便，在不影响近似程度的前提下，一般取 $n=12$ ，且令 U 为区间(0, 1)上服从均匀分布的随机噪声，则可以由下式近似标准正态分布，从而避免了开平方和乘除法运算。

$$Y_k = \left(\sum_{i=1}^n U_i - 12 \times \frac{1}{2} \right) / \sqrt{12 \times \frac{1}{12}} = \sum_{i=1}^n U_i - 6 \quad (4.5.15)$$

2) 函数反变换法

反变换法是将一个均匀分布的随机变量转换为任意一种分布下的随机变量的方法中最简单最常用的一种。通常采用双变量将标准正态分布函数转换为极坐标形式，得到封闭形式的分布函数，就可以用反变换法来生成高斯噪声。设 U_1 和 U_2 为在区间(0,1)上服从均匀分布的随机噪声，则下面两个随机变量均服从均值为 0、方差为 1 的标准正态分布。

$$X = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos 2\pi U_2, Y = \sqrt{-2 \ln U_1} \sin 2\pi U_2 \quad (4.5.16)$$

另外还有一种效率较高的方法，这种方法的步骤为：

产生两个在区间(0, 1)上服从均匀分布的随机噪声 U_1 和 U_2 ；

令 $V_i = 2U_i - 1$ ($i=1,2$)， $W = V_1^2 + V_2^2$ ；

若 $W > 1$ ，则返回；

若 $W \leq 1$ ，则下面两个随机变量均服从标准正态分布：

$$X = V_1 \sqrt{-2 \ln W / W}, Y = V_2 \sqrt{-2 \ln W / W} \quad (4.5.17)$$

在通过上述近似法或函数反变换法得到标准正态分布的随机噪声后，可以通过线性变换来获得均值为 μ ，均方差为 σ 的随机噪声。

通过对仿真图像加入不同强度的噪声，就可以检验某一算法程序的抗噪声能力，即在不同强度噪声水平下，目标定位的精度。如果在仿真噪声与实际噪声水平相当的情况下，测量精度满足要求，则算法具有实用性。否则就要选用符合精度要求的其它算法。

(3) 脉冲（盐与胡椒）噪声仿真

脉冲噪声主要是由于电子线路中的不确定因素等引起的，表现为像素灰度值为 255(盐噪声)或 0(胡椒噪声)。脉冲噪声通常只与位置有关，而和像素的灰度值无关。

设 U 为在区间(0,1)上服从均匀分布的随机噪声， R_s 为盐噪声的比例， R_p 为胡椒噪声的比例，则可用下式在图像中仿真生成脉冲噪声。

$$f'(x, y) = \begin{cases} 255 & , \quad U \leq R_s \\ f(x, y) & , \quad R_s < U < (1 - R_p) \\ 0 & , \quad U \geq (1 - R_p) \end{cases} \quad (4.5.18)$$

图 4.5.6(b)是对原图像(a)加入了均方差为 20 的高斯噪声后的图像，(c)是对(a)加入了 $R_s=R_p=0.1$ 的脉冲噪声的图像。脉冲噪声在数字成像技术发展的早期是较为常见的问题，现在已不常见，主要在一些低端的产品存在。在上述仿真噪声的生成原理基础上变化可以产生其它模式的仿真噪声。

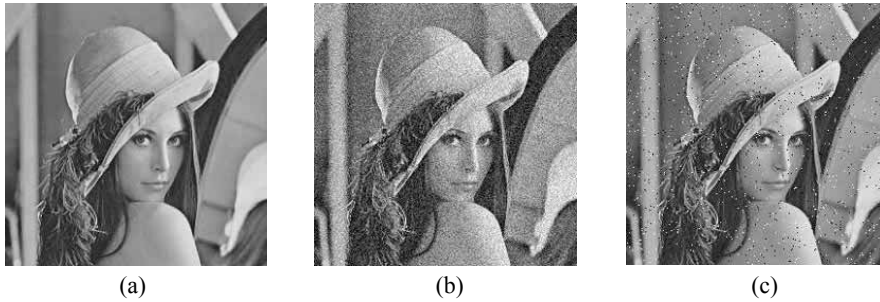


图 4.5.6 噪声仿真图实例

4.6 亚像素定位技术在面内转角测量中的应用实例

前面介绍了亚像素定位技术基本原理和方法。实际应用中要针对具体情况和条件设计采用具体的方法和算法，分析确定实际定位精度。具体精度与实际对象的成像质量、成像尺度、方向、甚至像素采样的位置等多方面因素有关。我们在像机标定、网格法变形测量、目标运动测量等摄像测量实践中，都应用了亚像素定位技术，实现了目标图像位置的高精度提取定位^[19~22]。下面针对我们在科研与工程中以 5" 的高精度测量转角的实例，给出亚像素定位技术应用的过程。

转角测量在工业、军事、航天、航海等许多领域有广泛需求，并且对测量精度的要求也越来越高。我们提出了一种高精度提取直线特征的算法，选用长直线作为辅助标志，通过高精度检测图像上标志直线的倾斜角度来计算转角。普通精度的面内转角图像测量已经可以方便地实现，但对 3"~5" 精度的测量需要考虑更多的影响因素。

4.6.1 利用直线标志进行面内转角测量的方法^[23]

选取直线作为合作标志固定在待测的转动平面内并随之一起转动，使摄像机光轴垂直于转动平面对合作标志进行拍摄，如图 4.6.1 所示。转动前后两次成像中直线倾角的差就是待测转角的大小。高精度检测图像中直线的倾斜角度是精密转角测量的关键。

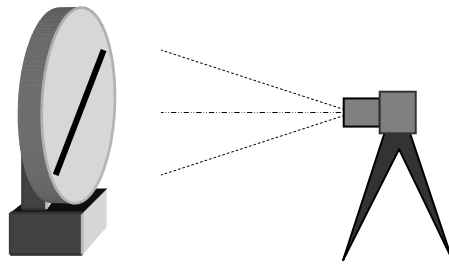


图 4.6.1 基于直线标志成像测量转角

为高精度定位直线，我们采用了两阶段拟合法。方法包括直线截面的高斯拟合和截面中心的直线拟合两部分。图像上直线截面灰度分布近似为高斯函数，用高斯函数对截面灰度分布进行拟合，据此确定截面中心的精确位置参数。对直线所有截面高斯拟合提取中心点，得到直线所有截面中心点的位置参数 $p_i(x, y)$ 。将全部截面中心点 $p_i(x, y)$ 用最小二乘法拟合直线得到直线参数，计算直线倾斜角度、中心位置等参数的精确值。以上两阶段有大量点参与拟合检测，能显著提高直线检测的精度。

4.6.2 实验结论及分析

(1) 影响转角测量精度的因素分析

基于图像的转角测量涉及图像检测和测量系统的构架两方面问题，为实现角秒级的测量精度必须对测量中每一个环节进行研究，这里重点对图像检测方面的因素进行了分析，并直接给出有关测量系统构架方面的分析结论。

1) 标志直线成像长度

在点定位精度一定的情况下增加直线成像长度可以提高角度检测精度，在应用中应该在像机硬件条件允许下选取尽量长的直线标志，以获得高的测量精度。

2) 参加拟合的截面选取方法

对直线截面进行高斯拟合时截面的选取方式有两种：如图 4.6.2 所示，一是总垂直于直线的方向截面 1，二是最接近于垂直直线方向的采样方向、或者与采样方向成 45° 角的特定方向的截面 2。在实际图像中这两种方法的检测精度相当，而选取整像素点位置的截面可显著减少运算量，所以使用第二种截面选取方法。

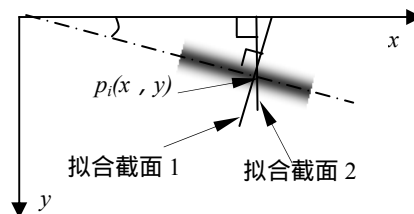


图 4.6.2 直线拟合截面选取方式

3) 标志直线的成像宽度

在对比度一定的情况下,增加宽度导致直线截面灰度变化更加平滑,定位精度变差;而在很小宽度时,由于数据量减少,抗噪能力降低,会使定位精度下降,实际应用中选用 5~11 像素宽的直线较为合适。

4) 直线中心移位对直线角度检测精度的影响

当直线的像在成像平面上沿垂直于直线的方向平行移动时,采样点在直线截面的采样位置也发生相同移动。采样位置偏离整像素位置的距离会对直线定位产生影响。分析表明拟合法检测直线角度对这种平移不敏感,当存在噪声时这种影响更加不敏感。

5) 采样角度的影响

数字图像的离散二维空间等距离采样对有一定转角的直线而言是非均匀采样,当直线与采样方向成不同角度时,检测直线角度会产生不同误差。在直线角度与采样方向成 0° 角或者 45° 角时,图像采样点在各个截面的分布位置相近,这些截面中心的定位误差的大小和方向相仿,在计算角度时就会产生积累,导致角度测量出现较大误差。在实际应用中应避免与采样方向成 0° 和 45° 附近的特殊角度。

(2) 实测实验结果

实验中带直线标志的圆盘固定在转角精确可控的经纬仪上,经纬仪以 $0.5''$ 的精度给出直线标志旋转角度。用光轴垂直于圆盘平面的相机采集转动前后圆盘的图像,用前述方法检测圆盘上直线的倾角,得到转角测量值。实验中直线角度以相对采样方向 10° 为起始点,经纬仪每旋转 $240''$ 采集一次图像,进行角度检测,统计测量误差。直线成像长度为 1000 像素,取宽度为 5 个像素的直线 1 和宽度为 9 个像素的直线 2 进行检测。三组独立实验结果见表 4.6.1。实验表明该方法测量转角的均方误差约为 $3''$,是一种有效的高精度转角测量方法。

表 4.6.1 转角测量实验结果

	检测角度误差均方差(角秒)					
	第一组实验		第二组实验		第三组实验	
	直线 1	直线 2	直线 1	直线 2	直线 1	直线 2
误差均方差 σ	2.96	3.21	2.89	2.92	3.30	2.41

参考文献

- [1] West G A, Clark T A. A Survey and Examination of Subpixel Measurement Techniques[J]. Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1990, SPIE 1395 : 456-462.
- [2] Cox J A. Evaluation of peak location algorithms with subpixel accuracy for mosaic focal planes[J].

- Processing of images and Data from Optical Sensors,1981, SPIE 292 : 288-299.
- [3] Fillard J P, M'timet H, Lussert J M, et al. Computer simulation of super resolution point source image detection[J]. Opt Eng, 1993, 32(11) : 2936-2944.
- [4] Tabatabai A J, Mitchell O R. Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery[J]. IEEE Trans on PAMI, 1984, 6(2) : 188-201.
- [5] Castleman K R 著. 数字图像处理[M]. 北京 : 清华大学出版社, 1998.
- [6] Ghosa S, Rajiv M. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. Pattern recognition, 1993, 26(2) : 295-306
- [7] Kisworo M, Venkatesh S, West G. Modeling edges at subpixel accuracy using the local energy approach[J]. IEEE Trans on PAMI, 1994, 16(4) : 405-410.
- [8] O. Gorman L. Subpixel precision of straight edged shapes for registration and measurement[J]. IEEE Trans on PAMI, 1996, 18(7) : 746-751.
- [9] Seitz P. Optical superresolution using solid-state cameras and digital signal processing[J]. Opt Eng, 1988, 27(7) : 535-540.
- [10] Huertas A, Medioni G. Detection of intensity changes with subpixel accuracy using laplacian gaussian masks[J], IEEE Trans on PAMI, 1986, 8(5) : 651 ~ 664.
- [11] Jensen K, Anastassiou. Subpixel edge localization and the interpolation of still images[J]. IEEE Trans on PAMI, 1995, 4(3) : 285 ~ 295.
- [12] 张祖勋, 张剑清 编著. 数字摄影测量学[M]. 武汉 : 武汉测绘科技大学出版社, 1996.
- [13] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [14] 于起峰, 伏思华. 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [15] Yu Q F. Spin filtering processes and automatic extraction of fringe center-lines from interferometric patterns[J]. Appl Opt, 1988, 27(18): 3782-3784.
- [16] Yu Q F, Fu S H, et. al.. Generation of speckle-reduced phase images from three complex parts for synthetic aperture radar interferometry[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(11).
- [17] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[J]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [18] 王维平. 离散事件系统建模与仿真[J]. 长沙: 国防科大出版社, 1997.
- [19] 雷志辉, 于起峰. 亚像素图像处理技术及其在网格法的应用[J]. 国防科技大学学报, 1996, 18(4): 17-20.
- [20] 于起峰, 孙祥一. 用标定和亚像素技术实现三维运动目标的高精度测量[J]. 宇航学报, 1999, 20(3): 36-42.
- [21] 权铁汉, 于起峰. 摄影测量系统的高精度标定与修正[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 748-755.
- [22] 权铁汉, 陆宏伟, 于起峰. 网格法及其在大变形测量中的应用[J]. 实验力学, 2000, 15(1): 83-91.
- [23] 李立春, 于起峰, 雷志辉. 基于数字图像的高精度面内转角测量方法[J]. 光学学报, 2005, 25(4): 491-496.

第五章 图像序列运动目标检测与跟踪

将一组按一定规律、有一定内在联系的图像组合在一起就形成了一个图像序列。最常见、最常用的图像序列是时间序列图像。通常将运动物体在各个不同时刻 t_i 的一系列图像记录下来，形成一组时间图像序列，记为 $f(x, y, t_0), f(x, y, t_1) \dots f(x, y, t_n)$ 。摄像测量学所涉及的用摄像机记录物体运动现象，或通过摄像机自身运动拍摄静止图像，通常都是时间序列图像。实际应用中，图像序列还可以由其它参数来决定，例如由从不同拍摄角度或位置获得的图像组成的序列。

对图像序列的处理，可以先分别孤立地对每幅图像进行处理，即将每一幅图像作为静态的图像处理，然后将各幅图处理的结果组合在一起。这种方法虽然可行，但由于没有充分利用图像序列的内在联系这一重要信息，会影响处理的结果、速度和测量精度。通常，序列图像中的对象、目标都具有一定的内在联系，通过对其中一幅图的相邻几幅图甚至整个序列图像的关联处理或联合处理，同时考虑各图像间的时间、拍摄方位等关系，可以得到单幅图像得不到的目标或摄像平台的运动参数或其它特性参数，并且处理速度和测量精度会有明显提高。本章着重介绍针对图像序列特点的算法。

运动目标检测与跟踪技术在靶场测量、场景目标监视、交通流量监测、人体运动分析、飞行器制导、视频压缩等许多方面得到了广泛的应用。运动目标检测方法有很多，主要有差图像法、光流法、基于主动轮廓线模型的方法、基于统计模型的方法、基于小波的方法、基于人工神经网络的方法，粒子滤波、Mean shift 等方法。

根据摄像机和场景是否运动可将运动划分为四种模式：摄像机静止 - 物体静止、摄像机静止 - 物体运动、摄像机运动 - 物体静止和摄像机运动 - 物体运动。每一种模式需要不同的分析方式和算法。摄像机静止 - 物体静止属于简单的静态场景分析；摄像机静止 - 物体运动是一类非常重要的场景分析，包括运动目标检测、目标运动特性估计，主要用于监视、预警和目标跟踪等；摄像机运动 - 物体静止是另一种非常重要的动态场景分析，包括基于运动的场景分析、理解、三维运动分析等，主要用于移动机器人视觉导航、目标自动锁定识别等；摄像机和物体都运动是摄像测量、计算机视觉中最一般的情况，处理起来最为复杂。本书第八章主要涉及的是摄像机运动 - 物体静止的模式，第十章主要涉及的是摄像机运动 - 物体运动的模式。本章所讲的运动目标检测主要是针对摄像机静止 - 物体运动、摄像机运动 - 物体运动两种模式而言。

5.1 运动目标检测的数字减影法

5.1.1 数字减影法基本原理

数字减影法又称差图像法，是在运动目标检测中使用得最多的一类算法^[1,2]。它的突出特点是实现简单、运算速度快，检测效果较好。其基本原理是将图像序列中前后两帧图像对应像素点的灰度值相减得到差图像，如果两幅图完全一致，则得到一幅全零(全黑)的差图像；若两幅图像虽背景相同，但有一目标在运动，则得到背景处为零而目标区域不为零的差图像。在环境亮度变化不大的情况下，如果两帧图像对应像素灰度相差很小，可以认为此处景物是静止的，如果图像区域某处的灰度变化很大，可以认为这是由于图像中运动物体引起的，就可以求出运动目标在图像中的位置和大小。由于目标大小、背景亮度的差别，对差图像的分割方法也不尽相同；另外当目标有阴影干扰时也要进行特殊处理，文献[3]对此进行了详细的讨论。

图 5.1.1 (a)和(b)分别是目标运动前后的图像，这里假设目标的灰度小于背景的灰度。图 5.1.1 (c)是图 5.1.1 (a)与(b)的差图像，图中灰色部分表示零差值，白色代表正差值，黑色代表负差值。可以看出原图中静止的背景被减掉了，运动的目标被突出了，其中黑区域是目标运动的新区域，而白区域是目标运动的消失部分。实际应用中，既可测量新运动区，又可只测量消失部分，或同时测量两个区域。

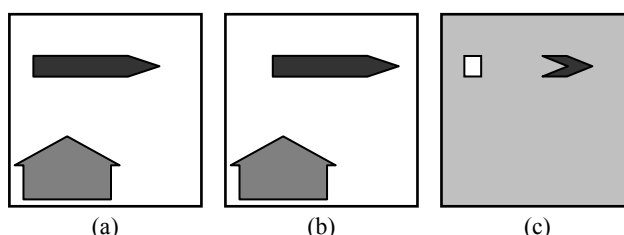


图 5.1.1 数字减影法示意图

两帧图像 $f(x, y, j)$ 与 $f(x, y, k)$ 之间的变化可用一个二值差图像 $DP_{jk}^p f(x, y)$ 表示：

$$DP_{jk}^p f(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{如果 } |f(x, y, j) - f(x, y, k)| > T \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5.1.1)$$

其中 T 是判断对应区域是否发生变化的阈值。在差图像中，取值为 255 的像素点被认为是物体运动或光照变化的结果。如果忽略光照的影响，这些取值为 255 的像素点就是由物体运动产生的，由此可以检测出目标的运动。

数字减影法是用于目标运动检测和识别的一种最简单、常用和重要的方法，具有广泛的应用。特别是当摄像机静止，并能事先拍摄到一幅无目标的背景图像时，可将后续

有目标的图像与背景图像相减，得到背景为零，只有目标区有亮度的差图像，因此可以很方便地得到目标的位置和边界，从而对目标进行识别和定位。

具有复杂背景的目标识别常常由于背景的干扰使识别算法非常复杂，并且可靠性降低。利用这种减背景的数字减影法，可以提高目标识别定位的可靠性。图 5.1.2(a)和(b)是某实验件在同一试验场两个不同时刻的图像，要求对目标进行定位，并通过提取目标边界确定目标的姿态。由于目标形状不规则，背景与目标边界的灰度无明显差别，使得目标提取的工作难度较大。图 5.1.2(c)是(a)和(b)两幅图进行数字减影的结果图。可见，目标区域被明显地突出出来，很容易由后处理确定目标边界。

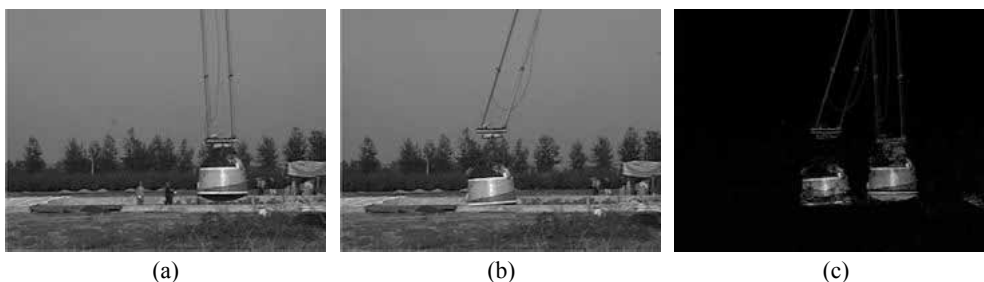


图 5.1.2 实际图像减影效果

由于数字减影法具有计算速度快，敏感度高等优点，针对差图像的目标检测算法十分常见，有些算法已经很成熟，并制成了相应的硬件系统，例如安检部门通常在需要重点防范的地方加装摄像头，利用摄像头实时采集图像，将这些图像作邻帧差运算得到差图像，就可以检测出运动目标并进行报警等。

5.1.2 背景运动的补偿

基本的数字减影法是以图像背景固定不变为前提的。如果摄像系统有变化，如在运动目标的图像序列拍摄时，摄像平台有时会不稳定，特别是胶片式高速摄影机在高速摄影时难免会发生抖动，则运动目标和背景都会出现变化量，图像间直接作差得到的减影图将是混乱的，并且目标的变化量同时包括了目标自身运动变化和摄像系统抖动引起的变化。针对这种情况，许多学者提出了基于背景变化补偿差分的运动目标检测方法^[4]，先对由于摄像机运动引起的背景移动进行补偿再进行差分运算。有两种方法可以用来消除背景相对运动造成的影响：一种是通过闭环系统的自反馈得到镜头的运动参数进行补偿，例如利用差图像法检测经纬仪序列图像中的运动目标时，由于已知拍摄每幅图像时经纬仪的高低角和方位角，即背景的运动是已知的，可以先进行背景运动补偿再由差图像法得到运动目标。另一种是对背景中特征较明显的区域（内基准点）进行匹配，得到背景

的偏移量再进行补偿。比较而言，第二种方法完全不依赖于跟踪系统的回路参数，而且当背景中有明显结构特征时配准精度较高，可以取得更好的背景补偿效果。

(1) 内基准点或背景区域匹配法

首先找到自然的、或人为设置的相对于背景没有运动的内基准点。内基准点要易于匹配和高精度定位，例如人为设置的标杆、标志，或自然的屋顶角、窗门角、树杈等。然后在待相减的两幅图像上，分别确定内基准点的精确位置。实际中也可以直接用景象匹配的方法对两幅图的背景进行匹配定位，得到背景变化量。设两幅图像间背景只有平动，同一基准点在前后两幅图 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 中的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ，则差图像 $I_d(x,y)$ 可表示为

$$I_d(x, y) = I_2(x, y) - I_1(x - dx, y - dy) \quad (5.1.2)$$

其中 $dx = x_2 - x_1$, $dy = y_2 - y_1$ 。同理，对于背景有转动的情况，则应该选取两个以上的内基准点，以测出转动量，并在相减中进行补偿。用这种方法可以有效地将摄像抖动等系统误差消除掉。

上述方法中，假设像机抖动引起的图像变化是刚性位移，只有平移和旋转，而图像本身没有变形存在。对非线性畸变很小的高质量镜头，这个假设是合理的。但当镜头畸变较大时，该方法仅对内基准点附近区域成立，而对较远区域会有一定误差，应对镜头误差进行标定和修正。

(2) 背景配准或内基准点的亚像素定位

内基准点定位精度是整像素点时，可认为它存在 0.5 个像素的误差。在边缘等灰度梯度较大区域，0.5 个像素误差将引起明显的灰度变化，即使采用内基准点匹配的方法，也仍会在各种背景边缘处减出许多变化量，影响差图像质量。而且这种内基准点定位误差将直接累加进差图像目标检测的结果中，因此应该对内基准点进行亚像素定位。根据实际的内基准点的特征，可选取不同的亚像素定位技术。具体可参看本书第四章。

(3) 相减图像的插值

当内基准点采用亚像素精度定位时，由像机抖动引起的内基准点位移量 dx 和 dy 通常也不再是整像素。因此在数字减影公式中，其中一幅图像的各像素的灰度值将对应原图像亚像素位置的灰度值，通常采用双线性插值等算法来获得亚像素位置的灰度值。

5.1.3 基于正负差图像的运动目标检测算法原理

前节中的差图像法的前提条件是摄像系统和背景均是静止的。如果摄像系统有变化，则运动目标和背景都会出现位置变化量，其差图像是混乱的，难以应用于检测。针对试

靶场中摄像机运动或者镜头焦距变化的情况，我们提出基于正负差图像的运动目标检测算法，充分利用正负差图像的对称性，不需要对背景运动进行补偿，可明显提高差图像法运动目标检测的可靠性与适应性。下面简述该方法的特点，详细内容参见文献[5,6]。

传统差图像法采用的是绝对值差运算，在差图像上会出现两个目标区域，即目标运动的新区域和消失区域，同时还会有噪声区域，如图 5.1.3(c)。对于多数序列图像，可以认为图像上目标与背景的灰度模式不变，而且目标在两幅图像上没有重叠，因此，差图像上对应于目标的两个区域应该具有相同的灰度与形状分布模式。据此，在对目标形状、尺度等信息不限定的条件下，可以对差图像上所有可能的区域两两进行组合匹配，其中灰度与形状分布模式最接近的一对区域就对应于目标的区域。

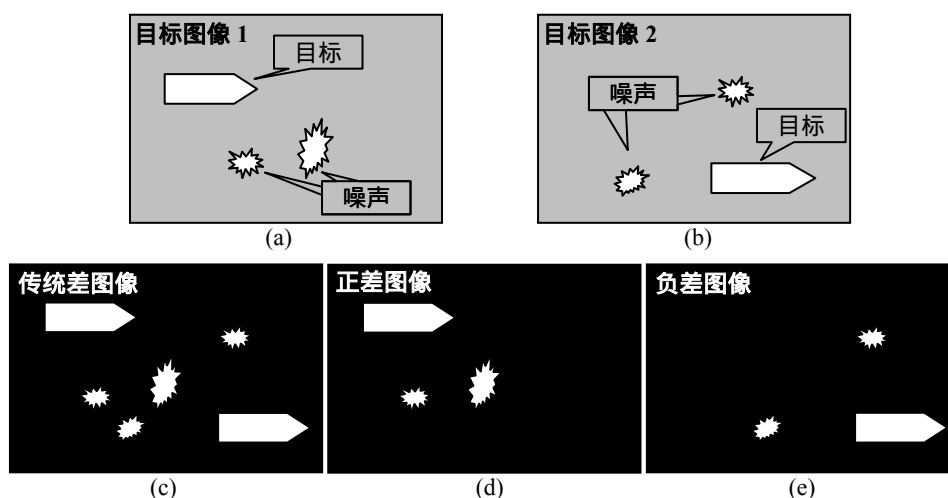


图 5.1.3 传统差图像和正负差图像

正负差图像法在差运算时根据差值的正负，分别生成正差图像与负差图像，如图 5.1.3(d)和(e)。正负差图像目标区域有这样的性质：同一个目标分别在正、负差图像上各有一个对应区域，且只有一个区域。因此仅需要在正差与负差图像之间进行可能目标区域的组合匹配，而不用考虑正、负差图像内部各区域的组合，从而比绝对值差图像法显著地减少了可能区域的组合数。同时，正负差图像法可以方便地对检测结果进行验证，检查这两个区域的灰度与形状分布的相似性，提高检测结果可信度。

正负差图像的运动目标检测算法不要求背景近似静止，但要求背景中没有明显的结构性物体。该算法相对于传统差图像法能更好地适应靶场序列图像，尤其是复杂背景图像的运动目标检测。在结构性背景不强的情况下，即使不进行背景运动补偿，该方法也能得到较可靠的检测结果，适应性强。

5.2 特征标志的自动识别跟踪

摄像测量中分析某些特定目标运动时，例如人体运动，汽车冲击、交会对接等，常在目标某些位置上制备合作标志，其中最简单的标志是圆标志、十字丝标志和对角标志，如图 5.2.1 所示。然后根据标志的已知特征，建立相应的数学模型，用特征识别方法对目标特征进行识别提取和跟踪。这种方法称为特征识别跟踪法。其主要优点是可靠性较高、受背景环境干扰小、计算量小等。

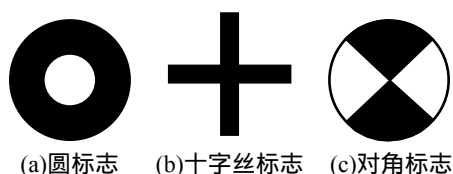


图 5.2.1 几种常用的合作标志

图像模式识别、特征识别技术是一个涉及面深而广的课程，有许多不同的原理和方法。要深入了解掌握这些原理方法，读者可参阅有关书籍资料。本节只介绍几种常用合作标志的自动识别跟踪原理和算法。

5.2.1 圆标志的识别定位

一种圆标志识别定位算法的主要步骤如下：

- 1) 对图像进行预处理，如滤除噪声，线性增强等；
- 2) 对圆标志进行二值化或提取边缘，得到图像中可能目标的特征，如区域的面积 S 和周长 L 。
- 3) 根据得到的目标特征对目标进行模式识别，并用亚像素方法定位。

对圆标志进行模式识别最常用的判据有以下几种^[7]：

形状参数

形状参数 F 是根据目标区域的周长 L 和面积 S 计算出来的：

$$F = \frac{L^2}{4\pi S} \quad (5.2.1)$$

由上式可知，当目标为圆形时 $F=1$ ，当目标为其它形状时 F 大于 1。形状参数在一定程度上描述了区域的紧凑性，对尺度和旋转变化的不敏感。需要注意的是，在有的情况下，仅靠形状参数 F 并不能把不同形状的目标分开。

有效半径

目标区域 S 的有效半径 R 定义为

$$R = \frac{2S}{L} \quad (5.2.2)$$

偏心率

偏心率 E 也可称为伸长度，它也描述了目标的紧凑性。偏心率有多种计算公式。一种常用简单的方法是计算目标边界长轴和短轴的比值，不过这样的计算受目标的形状和噪声影响较大。利用矩来计算偏心率可得到较稳定的结果，其计算公式为

$$E = \sqrt{\frac{(M_{20} + M_{02} + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2})}{(M_{20} + M_{02} - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2})}} \quad (5.2.3)$$

其中

$$M_{pq} = \sum_{(i,j) \in S} (i - x_0)^p (j - y_0)^q \quad (5.2.4)$$

为区域 S 的 $p+q$ 阶离散中心矩， (x_0, y_0) 为区域的重心。

圆形成度

圆形成度 C 是根据目标所有边界点定义的特征量：

$$C = \frac{\mu_R}{\sigma_R} \quad (5.2.5)$$

其中 μ_R 为边界点到目标区域重心的平均距离， σ_R 为边界点到目标区域重心的距离的均方差。当区域趋向圆形时特征量 C 趋向无穷大。可综合上述特征量来对圆目标进行模式识别。

5.2.2 十字丝标志的识别定位

对十字丝标志进行识别与定位可采用如下的步骤：

- 1) 对图像进行滤除噪声，线性增强等预处理。
- 2) 对图像进行分割，得到二值目标，对二值目标进行滤波和细化运算，然后用 Hough 变换检测十字丝两交叉直线的方位。
- 3) 以两条直线的交点为十字丝的搜索区域中心点，选取一个搜索区域，然后根据十字丝的角度和线宽度制作理想的相关模板，在目标搜索区域内进行亚像素相关运算，对目标进行亚像素定位。

5.2.3 对角标志的识别定位^[8]

对角标志由黑白相间的 4 个角形区域组成，如图 5.2.1(c)。对角标志构造简单、特征明显，并且对目标尺寸、拍摄方位等不敏感，成像时能够较好保持其灰度和几何特征，

定位中心不会发生偏移；特别是标志中心处灰度梯度大，便于使用相关拟合等方法进行高精度定位。

对角标志成像时的灰度分布有以下特征：

- 1) 中心区域平均灰度与整个标志的平均灰度相近；
- 2) 相对角形区域同为亮或暗，平均灰度差异小；
- 3) 相邻角形区域一亮一暗，平均灰度差异大；
- 4) 四个角形区域各自的平均灰度与整个标志的平均灰度差异大；
- 5) 同一角形区域内灰度分布较均匀。

根据上述特征可以设计自动识别算法，在全图或指定区域检测对角标志。之后制作理想的对角标志模板，对标志进行亚像素相关定位。

5.2.4 SIFT 特征提取方法

上述的几种对特征标志的识别算法利用了定制的合作标志特有的几何和灰度信息。而对于一般自然景物目标，还可以通过对目标区域某种不变性特征进行描述来实现对目标的识别提取。目前国际上公认效果良好的特征点提取匹配方法 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法，可以将图像目标区域的梯度方向、强度以及特征尺度信息综合考虑来描述目标的尺度、旋转不变性特征，高适应性地实现了对图像特征点的提取^[9]。这里简要介绍 SIFT 对不变性特征的提取和描述过程。

1) 统计主方向

利用图像区域所有像素的梯度方向和梯度强度分布的统计特性确定主方向参数，使特征具备旋转不变性。如图 5.2.2(a)中，每个小箭头表示各像素点的梯度大小和方向，将梯度方向划分为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间的 n 个方向。将区域内所有像素点的梯度强度根据其梯度方向 r_k 累加到对应方向的梯度强度 $h(r_k)$ 上，形成以 r_k 为自变量，以 $h(r_k)$ 为变量的梯度方向强度直方图。此直方图的最大值对应的梯度方向就定义为图像特征的主方向。类似地还可以建立直方图次大值对应的第二主方向等。在计算各方向的梯度强度时，可以根据各像素点距离特征中心的距离对像素点的梯度强度进行加权累加，得到梯度强度 $h(r_k)$ 。

2) 消除旋转差异

以特征点为中心，将特征区域内所有像素点整体进行旋转，使旋转后的主方向与图像像素坐标系的某个坐标轴方向平行，如图 5.2.2(b)所示。并对每个特征点的梯度方向做相应旋转。在实际应用中，可以不对图像作旋转，而仅记下该主方向，在后续处理中以该主方向为基准进行计算和处理即可。

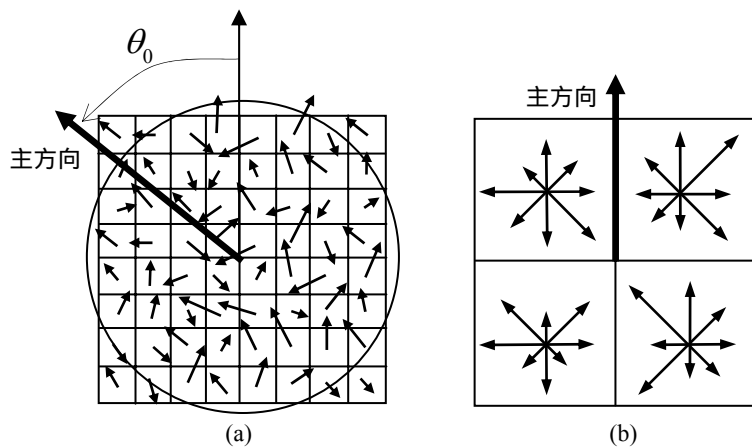


图 5.2.2 SIFT 对不变性特征的提取和描述

3) 建立特征向量描述

以旋转后的特征区域为对象，将特征区域划分为可 $m \times m$ 个子区域，例如图 5.2.2(b) 中将特征区域划分为 2×2 个子区域。与统计特征区域梯度方向强度直方图类似，统计每个子区域内的梯度方向强度直方图，也就是得到该子区域 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间划分的 n 个方向中各方向的梯度强度。各子区域内所有梯度方向强度向量组合，形成对该特征点的向量描述。为了能够适应图像灰度强度的变化，将特征向量中各分量进行归一化。如果选取多个主方向，则对每一主方向都建立对应的特征向量描述。

基于上述的特征向量描述，通过比较两幅图像待匹配特征点特征向量之间的距离来完成特征的匹配提取。该匹配提取过程能够消除图像之间旋转的影响，对于图像间的较小的缩放也具有较好的适应性。

5.3 基于模板匹配的目标识别跟踪技术

从基准图或序列图像的某幅图中取出目标区域作为模板，或者根据目标成像特征制作理想模板，再用该模板与序列图像逐幅图进行匹配，可以进行目标的识别和跟踪。这类方法在目标没有特别显著的几何特征，并且不便于加装合作标志的情况下，也能够实现对目标的识别和跟踪。

5.3.1 相关匹配跟踪方法

相关定位技术的原理和方法在第四章介绍亚像素定位技术时已有详细介绍，这里不再赘述。相关匹配跟踪是用目标模板对当前图像待搜索区域进行相关运算，找到相关系数取最大值的点后，利用二次曲面拟合或亚像素步长法获得亚像素的定位点，即最佳匹配点，作为目标在当前图像上的位置。目标模板的选取对高可靠、高精度地匹配跟踪目

标是至关重要的。实际应用中，应尽量选取目标特征明显、灰度梯度大的区域作为匹配跟踪的对象，具体要求可参看第四章的有关内容。相关匹配跟踪应用中，目标模板通常分为如下几种类型：

- 1) 理想仿真目标；
- 2) 第一幅确定了目标的图像的目标特征区；
- 3) 前一幅图的目标特征区；
- 4) 指定的前 n 幅图的目标特征区。

当目标较简单，可方便地用数学模型表示时，常采用第一种形式。当在整个图像序列中目标的特征变化不大，为了防止不同噪声的干扰，常采用第二种形式，即只取第一幅图的目标特征区，对整个图像序列进行目标匹配跟踪。采用这种方法时，目标背景、光照、角度等参数的变化会给结果引入误差。

当由于拍摄角度变化、背景变化、光照场变化等因素，使目标特征在图像序列中发生缓慢变化时，常采用第三种形式，即每次搜索时取前一幅图的目标特征区作为模板，这种方法较稳定。但是由于拍摄角度变化、背景变化、光照场变化和噪声场变化等因素的影响，每次求相关系数最大值位置都会引入一定误差，并且这种误差会产生累积效应。当运算到一定长度的图像序列后，目标定位可能产生较大误差。如开始跟踪的是目标的头部，而后来慢慢偏移到目标的尾部，甚至移出目标区域。选用灰度梯度大的特征目标可以减小这种误差。

由于可选取图像的任意区域作为相关模板，也就是说，目标可以是任意分布的特征，因此相关跟踪法具有很大的灵活性和适用性，而且精度较高，可以说是“万能”跟踪法。当目标的背景、光照、角度等参量变化不大时，采用第一、二种模板形式，精度可达 $0.01 \sim 0.05$ 个像素。但当目标的角度、背景、光照、距离等发生变化时，通常只能采用第三、四种模板形式。此时由于多种变化因素和噪声的影响，目标跟踪会出现“误差累积、目标漂移”的现象，会有较大误差，甚至完全偏离目标。因此又可说相关跟踪法是“万不能”跟踪法。这时应慎重使用相关方法，可能时，尽量采用特征识别跟踪等其它方法。

在跟踪策略上，可认为由于目标运动是连续的，在前后图之间目标不会偏离太远，因此，每次取前幅图的目标位置作为后一幅图搜索的起点或粗定位点。对于经纬仪图像或前后目标相差较远时，则可采用目标运动轨迹预测的方法，预测当前图像目标的运动位置，缩小搜索窗口，以达到减小运算量、提高可靠性的目的。本章 5.6 节将详细介绍对序列图像目标运动轨迹进行预测的方法。

5.3.2 最小二乘匹配方法

上述的相关匹配跟踪方法仅对目标在图像中的位置进行二维搜索，找到与模板相关性最高的位置作为匹配定位结果。而当目标光照、角度等条件发生变化时，普通相关法会引入较大误差或不再适用。与普通相关匹配相比，最小二乘匹配进一步考虑了目标的灰度变化和几何变形，在更多的维数上来计算匹配结果，具有更好的适应性和定位精度。

以灰度差的平方和作为图像匹配中判断模板图像与当前图像相似性的度量。如果在此基础上引入系统变形的参数，依据最小二乘的原则，使模板图像与当前图像灰度差的平方和最小来求解这些变形参数，就构成了最小二乘匹配。

最小二乘匹配通常考虑两类系统变形。一类是由于环境照明及拍摄方向变化和大气衰减、图像数字化误差等引起的目标成像的灰度畸变，另一类是由于拍摄方位不同等因素所产生的目标成像的几何变形。例如考虑模板图像和当前图像之间存在 2.1.4 节式 (2.1.30) 所描述的仿射变形，包括平移、旋转、缩放和剪切。同时考虑模板图像和当前图像之间的线性灰度畸变，即

$$g_0(x_0, y_0) = h_0 + h_1 g_1(x_1, y_1) \quad (5.3.1)$$

其中 g_0 和 g_1 分别为模板图像和当前图像的灰度分布函数， (x_1, y_1) 为模板图像上 (x_0, y_0) 点在当前图像上的同名点。将仿射变形关系式(2.1.30)代入式(5.3.1)，得到综合考虑几何变形和灰度畸变的模板图像与当前图像间的关系：

$$g_0(x, y) = h_0 + h_1 g_1(a_0 x + a_1 y + a_2, a_3 x + a_4 y + a_5) \quad (5.3.2)$$

则在 (x, y) 处，对当前图像的几何变形和灰度畸变进行修正后与模板图像之间的灰度误差为

$$v(x, y) = h_0 + h_1 g_1(a_0 x + a_1 y + a_2, a_3 x + a_4 y + a_5) - g_0(x, y) \quad (5.3.3)$$

以 $\sum v^2$ 为最小化目标函数，最小二乘求解灰度畸变系数 h_0 、 h_1 和几何变形系数 $a_0 \sim a_5$ ，就比较全面地得到了模板图像和当前图像之间的变化情况，并且求解得到的 (a_2, a_5) 就是当前图像上目标位置相对于模板图像的偏移量。为了得到精度和可靠性更好的匹配结果，可以根据得到的灰度畸变系数和几何变形系数对图像目标区域进行校正，再对校正后的目标区域进行匹配定位。

相对于普通相关匹配，最小二乘匹配有更好的适应性，但也大大增加了计算量。而根据最小二乘匹配的基本原理，可以采用更复杂的几何变形和灰度畸变模型以提高匹配可靠性和精度，也可以采用相对简单的模型以提高计算速度。

5.3.3 基于生物视觉的目标跟踪

国际上基于生物视觉和 Gabor 函数基底的图像目标跟踪技术借鉴了生物生理学的研究成果，将目标的图像特征投射到仿生物视觉坐标系下进行分析。该方法对目标跟踪定位的精度高、鲁棒性好，并能够适应像机拍摄方位变化引起图像旋转、缩放、剪切等变化情况下对目标的可靠跟踪^[10,11]。

(1) 在仿生物视觉坐标系下描述图像

生物生理学的研究表明，灵长类动物对目标的识别和跟踪不是采用光强图像分析匹配的方法，而是将图像信息投影到视细胞坐标系下。灵长类动物通过视皮层上的许多柱状组织结构感受视觉信息，这些组织称为超柱。超柱提取目标在不同朝向上指定频带内的信息，而将其它不关心的信息滤除，也就是将高维的光强图像数据，转变为另一组低维基底下信息表达，称为超柱向量。同一目标不同时刻、不同方位在视觉系统中成的图像通常是不同的，而生物视觉系统通过调节单细胞的感受野函数，始终维持着该目标的超柱向量，从而维持该目标在大脑中的响应，实现对目标的识别和跟踪。

生物学的试验发现，Gabor 滤波器可以很好地近似单细胞的感受野函数。选取二维 Gabor 函数作为单细胞的感受野函数，调整 Gabor 函数的方向确定一组朝向。一个局部图像与 n 个 Gabor 模板分别做内积，得到的一个 n 维向量就作为超柱向量。其中二维 Gabor 函数的表示形式为：

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} e^{2\pi i(u_0x_1 + v_0y_1)} \quad (5.3.4)$$

其中 $x_1 = x\cos(\theta) + y\sin(\theta)$ ， $y_1 = -x\sin(\theta) + y\cos(\theta)$ ， σ_x 和 σ_y 是尺度参数， u_0 、 v_0 是 x、y 方向的频率参数， θ 确定了 Gabor 函数的朝向。如图 5.3.1 就是一组二维 Gabor 基底。一幅图像分别与 n 个由不同的 σ_x 、 σ_y 、 u_0 、 v_0 和 θ 决定的 Gabor 函数作内积即可得到一个 n 维的超柱向量，从而将图像变换到了仿生物视觉坐标系。

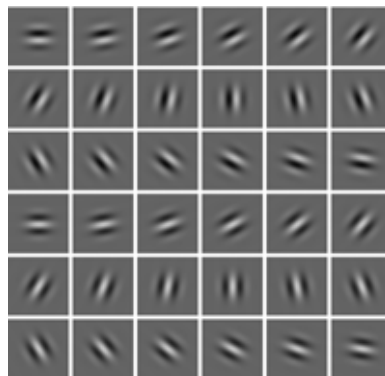


图 5.3.1 一组二维 Gabor 基底

(2) 图像匹配的实现

设选取的Gabor基底为 $g(x,y)$ ，模板图像为 $f(x,y)$ 。考虑当前匹配图像相对于模板图像仿射变形 $f'(x,y)=A^\circ f(x,y)$ ，具体的形式由式(2.1.30)描述，其中仿射变形参数为 $a_0\sim a_5$ 。

首先将模板图像和当前匹配图像都与Gabor基底作内积，变换到仿生物视觉坐标系：

$$G(x,y)=\langle g(x,y), f(x,y)\rangle, \quad G'(x,y)=\langle g(x,y), f'(x,y)\rangle \quad (5.3.5)$$

在仿生物视觉坐标系下，模板图像与当前匹配图像之间的欧氏距离为：

$$D=\sqrt{\sum(G(x,y)-G'(x,y))^2} \quad (5.3.6)$$

欧氏距离是描述仿生物视觉坐标系下，模板图像与当前匹配图像之间相似性的度量。以欧氏距离作为最小化目标函数，就可以优化求解模板图像与当前匹配图像之间的仿射变形参数 $a_0\sim a_5$ ，从而得到跟踪定位结果。

5.4 Mean Shift 跟踪算法

Mean Shift (均值漂移) 算法是一种有效的统计迭代算法，已广泛应用于聚类分析、目标跟踪、图像分割、图像平滑、滤波、图像边缘提取和信息融合等方面，是近年来国际上的研究热点之一^[12~14]。

Mean Shift 算法是一种非参数估计方法，也就是不需要首先假设目标具有某种统计特性。相比于参数估计方法，它适用范围更广。Mean shift 算法用于图像目标跟踪具有实时性好，容易与其它算法集成，对边缘遮挡、目标旋转、变形以及背景运动不敏感等优点。本节仅简要介绍它的基本原理，详细内容请参阅相关文献。

5.4.1 Mean Shift 算法基本原理和经典 Mean Shift 跟踪算法

(1) “均值漂移”基本原理

Mean Shift 的基本原理是通过统计迭代逐步“漂移”到密度函数的局部极大值处。这可以用图 5.4.1 形象地说明。

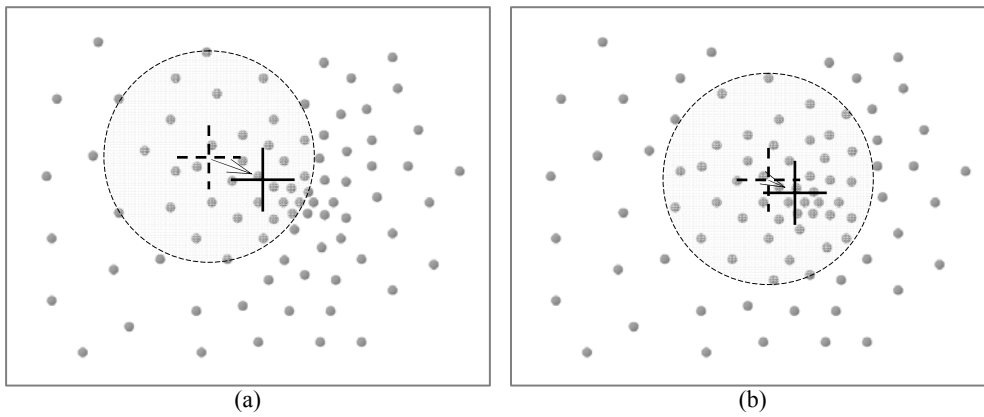


图 5.4.1 Mean Shift 过程示例

图 5.4.1 中的各灰色小点为相同特性的小球。按下面的过程搜索小球最密集的区域：在区域中任意选取一点（(a)图中的虚线十字丝）为起始点，选择一定大小的范围（(a)图中的虚线圆区域），统计该区域的“质量”重心（(a)图中的实线十字丝），则起始点到“质量”重心构成一个矢量，该矢量定义为 Mean Shift 矢量。将起始点移动到统计得到的“质量”重心，也就是“漂移”到统计区域的“均值”位置。不断重复这一过程，如图 5.4.1 (b)，当统计得到的“质量”重心越来越接近最密集的区域时，Mean Shift 矢量越来越小，通过该过程可以得到最密集区域的位置。这个计算过程即为 Mean Shift 过程。

(2) 经典 Mean Shift 跟踪算法

Mean Shift 跟踪的基本原理是在当前帧候选区域中通过 Mean Shift 算法迭代搜索当前目标特征与初始帧（或上一帧）目标特征相似性函数的极大值位置，从而确定目标跟踪定位结果。经典 Mean Shift 跟踪通过统计目标区域的直方图分布（对彩色图像为颜色直方图，对灰度图像为灰度直方图）来描述目标的特征。以两幅图像匹配窗口内直方图分布的相似性程度作为确定匹配跟踪结果的依据，并通过迭代搜索到最优匹配位置。

Mean Shift 跟踪的基本过程如下：

1) 计算初始帧的目标模板

设 $\mathbf{x}_i (i=1,2,\dots,N)$ 为目标窗口中第 i 个像素的坐标， N 为目标窗口的像素点总数，目标窗口的中心为 \mathbf{x}_* 。考虑彩色图像， m 为图像颜色直方图栅格总数（相当于灰度图像中灰度级别总数）。用下面的目标颜色直方图栅格特征向量 \mathbf{q} 作为目标特征描述向量， \mathbf{q} 的第 u 个分量为：

$$q_u = C \sum_{i=1}^N \left\{ k \left(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_*\|^2 \right) \cdot \delta [b(\mathbf{x}_i) - u] \right\}, u \in \{1, \dots, m\} \quad (5.4.1)$$

式中 C 为使 \mathbf{q} 的模为 1 的归一化常数 $b(\mathbf{x}_i)$ 将像素 \mathbf{x}_i 的颜色信息映射到相应的颜色直方图栅格中, $\delta(x)$ 为狄拉克函数, 即 $\delta(0)=1$, x 不为 0 时 $\delta(x)=0$ 。 $k(\|\mathbf{x}\|^2)$ 为核函数, 其中 $\|\mathbf{x}\|$ 表示 \mathbf{x} 的范数。核函数的作用是给目标区域的像素设置权值, 使离目标区域中心越近的像素权值越大, 例如常用的高斯核函数为 $k(\|\mathbf{x}\|^2) = ce^{-\|\mathbf{x}\|^2/2}$, 其中 c 为幅值。

2) 计算当前帧候选特征向量

以当前帧中目标预测位置 \mathbf{y} 为中心, 带宽参数 h 为半径选择一个圆形区域作为搜索窗口。设 $\mathbf{x}_i (i=1,2,\dots,N)$ 为当前帧中搜索窗口中第 i 个像素的坐标, N_h 为搜索窗口中像素总数, 类似式(5.4.1), 计算当前帧中搜索窗口的颜色直方图栅格特征向量 $\mathbf{p}(\mathbf{y})$ 的第 u 个分量为:

$$p_u(\mathbf{y}) = C_h \sum_{i=1}^{N_h} \left\{ k \left(\left\| \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{y}}{h} \right\|^2 \right) \cdot \delta[b(\mathbf{x}_i) - u] \right\}, \quad u \in \{1, \dots, m\} \quad (5.4.2)$$

其中 C_h 为使 $\mathbf{p}(\mathbf{y})$ 的模为 1 的归一化常数。

3) 建立相似性函数和计算当前帧跟踪结果

用下面的相似性函数来衡量初始帧目标模板和当前帧候选向量的相似程度:

$$\rho(\mathbf{y}) \equiv \rho[\mathbf{p}(\mathbf{y}), \mathbf{q}] = \sum_{u=1}^m \sqrt{q_u \cdot p_u(\mathbf{y})} \quad (5.4.3)$$

该相似性函数的取值范围在 0 到 1 之间, 其几何意义为 m 维单位向量 $(\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_m})$ 和 $(\sqrt{q_1}, \dots, \sqrt{q_m})$ 之间夹角的余弦值, 当两个向量夹角为零, 即相似性函数值为 1 时, 两个向量完全相似。对式(5.4.3)在 $\mathbf{p}(\mathbf{y})$ 处进行泰勒展开, 将相似性函数近似表示为:

$$\rho[\mathbf{p}(\mathbf{y}), \mathbf{q}] \approx \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sqrt{q_u \cdot p_u(\mathbf{y})} + \frac{C_h}{2} \sum_{i=1}^{N_h} \left[\omega_i k \left(\left\| \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_i}{h} \right\|^2 \right) \right] \quad (5.4.4)$$

其中 $\omega_i = \sum_{u=1}^m \left\{ \delta[b(\mathbf{x}_i) - u] \sqrt{q_u / p_u(\mathbf{y})} \right\}$ 。用 Mean Shift 算法对相似性函数求最大值, 计算新位置为:

$$\mathbf{y}' = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} \mathbf{x}_i \omega_i g \left(\left\| \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_i}{h} \right\|^2 \right)}{\sum_{i=1}^{N_h} \omega_i g \left(\left\| \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_i}{h} \right\|^2 \right)} \quad (5.4.5)$$

其中 $g(x) = -k'(x)$ 。再以 \mathbf{y}' 作为新的目标预测位置 \mathbf{y} , 重复上述的 2) 和 3), 迭代得

到最优的跟踪结果。

5.4.2 差异性加权 Mean Shift 跟踪算法

上述经典 Mean Shift 跟踪算法以目标为中心选择一个矩形或圆形区域，统计该区域的颜色（或灰度）直方图作为目标特征描述向量。在后续图像中以上一帧目标位置为中心选择一个更大的搜索区域，统计搜索区域的颜色直方图作为候选目标特征。通过使候选目标特征和目标特征描述向量最优匹配，得到最终的目标跟踪结果。Mean Shift 算法以其无需参数、快速模式匹配等特性而被广泛应用到目标跟踪领域。而对于复杂背景下运动目标跟踪问题，如果选择区域内存在较多背景时，会使目标初始特征建立不准确，这会严重影响 Mean Shift 跟踪算法的稳定性，甚至导致跟踪失败。为解决这一问题，除了尽量获得目标的准确描述范围外，一种可行的做法是对目标区域内的像素点进行加权处理。加权 Mean Shift 跟踪定位迭代公式为

$$\mathbf{y}' = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} \left[\mathbf{x}_i \omega_i g \left(\left\| \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_i}{h} \right\|^2 \right) W(\mathbf{x}_i) \right]}{\sum_{i=1}^{N_h} \left[\omega_i g \left(\left\| \frac{\mathbf{y} - \mathbf{x}_i}{h} \right\|^2 \right) W(\mathbf{x}_i) \right]} \quad (5.4.6)$$

可以根据目标区域和背景差别的大小来确定上式中的权值 $W(\mathbf{x}_i)$ 。为了更好地突出目标和抑制背景，我们提出了一种差异性加权 Mean Shift 跟踪算法，可以对复杂背景中的运动目标进行有效跟踪^[15,16]。该算法在统计选择区域的颜色直方图时，引入目标区域差异性权值信息，其中背景部分权值为零，而与背景差别较大的目标部分权值较大。这样就可以得到一种突出目标特征同时对背景有一定抑制的加权颜色直方图。将加权颜色直方图作为目标特征描述向量，可以有效提高 Mean Shift 跟踪算法的可靠性和稳定性。

(1) 差异性权值的计算

以目标为中心选择内区域和外围区域，如图5.4.2，图中实线框为内区域，虚线框与实线框之间为外围区域。因为外围区域和内区域直接相连，所以外围区域内的信息和内区域中背景信息最为接近。以外围区域统计的背景信息作为参考，就可以在内区域中较为准确地计算目标和背景的差异。

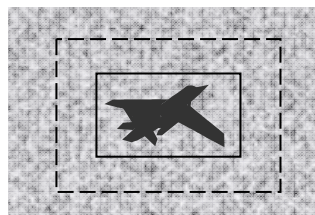


图5.4.2 以目标为中心选择内区域和外围区域

为了更为有效地统计内区域和外围区域中目标信息和背景信息，我们选择C-Mean算

法^[17]进行聚类，分别将内区域和外围区域中空间相近、颜色（或灰度）相似的区域划分为同一区域，根据聚类区域的差异性，给内区域中不同区域赋予不同权值。

例如分割好的区域如图5.4.3所示，内区域分割为区域1~区域7，外围区域分割为区域8~区域14。下面判断内区域中各个与外围区域邻接的分割区域是否为背景。以区域7为例，它与外围区域中的分割区域11、12、13和14相邻。分别计算这些区域的红、绿、蓝三种颜色的均值 Mr 、 Mg 、 Mb （如果是灰度图像，则计算灰度均值），判断区域11~14中哪一个与区域7的颜色最接近，即差异 $D=(|Mr_7-Mr_i|+|Mg_7-Mg_i|+|Mb_7-Mb_i|)$ 最小。如果差异最小的 D 值小于预先指定的阈值，则认为区域7应属于背景部分，将其权值置为0。将内区域已确定为背景的区域当作外区域看待，继续对内区域中其它分割区域做同样处理，即完成了对于目标和背景的分割。

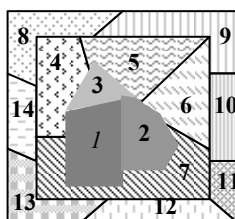


图5.4.3 对内区域和外围区域进行聚类分割

按下式计算内区域中背景 C_b 三个颜色分量的均值 Mr_b 、 Mg_b 、 Mb_b ，和目标的每个分割区域 C_t 三个颜色分量的均值 Mr_t 、 Mg_t 、 Mb_t ：

$$\begin{cases} Mr_b = \sum_{i \in C_b} \frac{r_i}{(r_i + g_i + b_i)}, & Mg_b = \sum_{i \in C_b} \frac{g_i}{(r_i + g_i + b_i)}, & Mb_b = \sum_{i \in C_b} \frac{b_i}{(r_i + g_i + b_i)} \\ Mr_t = \sum_{i \in C_t} \frac{r_i}{(r_i + g_i + b_i)}, & Mg_t = \sum_{i \in C_t} \frac{g_i}{(r_i + g_i + b_i)}, & Mb_t = \sum_{i \in C_t} \frac{b_i}{(r_i + g_i + b_i)} \end{cases} \quad (5.4.7)$$

则每个目标分割区域 C_t 的权值为

$$W_t = 1 - 1 / (1 + |Mr_t - Mr_b| + |Mg_t - Mg_b| + |Mb_t - Mb_b|) \quad (5.4.8)$$

(2) 验证实验

根据所得到的目标区域内各像素点的差异性权值，对复杂背景下运动目标图像进行差异性加权 Mean Shift 跟踪，一组实验结果如图 5.4.4。其中(a)为首帧图像，白框内为目标模板；(b)和(c)是后续图像序列中的两帧，白框为目标跟踪结果。实验结果表明我们的改进算法明显提高了跟踪结果的稳定性。

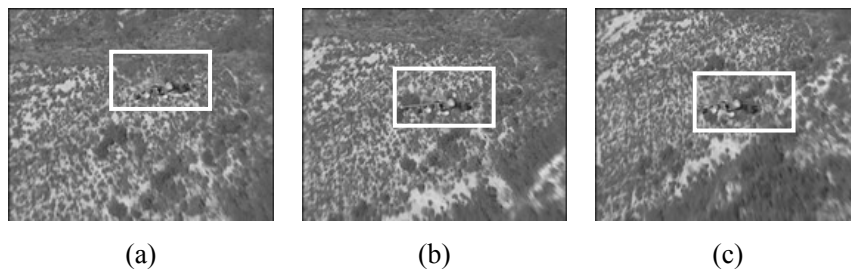


图 5.4.4 差异性加权 Mean Shift 跟踪结果

5.5 基于光流的运动检测

基于光流场的运动检测技术又称为基于时空梯度的运动估计和分析技术，是运动检测的一类重要方法^[18,19]。光流法经过大量的研究，现已有许多相对成熟的方法和算法，国际上已研制出比较成熟、但又有限制的应用系统商品。

光流法是利用图像序列关于时间和空间的灰度变化来估计物体位置速度场的方法。所谓光流是指图像中局部图像模式运动的速度，它是一种二维瞬时速度场，其二维速度矢量是物体可见的三维速度矢量在成像平面的投影。通过图像的灰度或物体表面的图像亮度模式的运动来描述的物体的运动，这种运动可以全场每个点都不一样，给图像每一个像素点赋予一个速度矢量，形成一个图像运动场，称为光流场。

光流法检测运动目标的原理是：在每一时刻，光流图像上的点对应于三维物体上的点，根据各像素点的速度矢量特征，对图像进行动态分析。如果图像中没有运动目标，则光流矢量在整个图像区域是常数或连续变化的；当目标和图像背景存在相对运动时，运动物体区域的速度矢量必然和邻域背景速度矢量不同，从而检测出运动物体的位置。

这种方法除了可以检测常规刚体目标的运动外，还适合于检测具有连续、缓慢变化速度场的运动，例如检测肺部呼吸运动、心脏的跳动等。对这类连续、缓慢变化速度场的检测，其它技术不是很方便，但光流场法可以方便地检测和描述这类运动。在许多应用问题中，光流法扮演着重要角色。它不仅包含了被观察物体的运动信息，而且携带着有关景物三维结构的丰富信息。同时光流场还可以应用于目标的配准。

5.5.1 光流场及光流场的基本方程

(1) 光流场和运动场

首先来区分两个概念：光流场和运动场。光流场是指图像灰度模式的表面运动。而运动场则是三维物体的实际运动在成像面上的投影。通常说来，光流场和运动场是一致的，也就是说光流场可以正确地反映物体的运动场。但也有二者不一致的特殊情况。例如理发店标志灯，是一根旋转的黑白螺旋条纹相间的圆柱体，它的运动场和光流场如图

5.5.1 所示。另一个例子是，当目标外表特性与背景极相似时，虽然目标在运动，但在图像上不能可靠地检测出运动变化，光流场没有变化。这两个例子说明光流场和运动场并不总是一样的。但对大多数情况来说，光流场能够正确地反映在像平面投影的运动场，因此通常可以从序列图像中计算光流场，进而计算得到运动场。

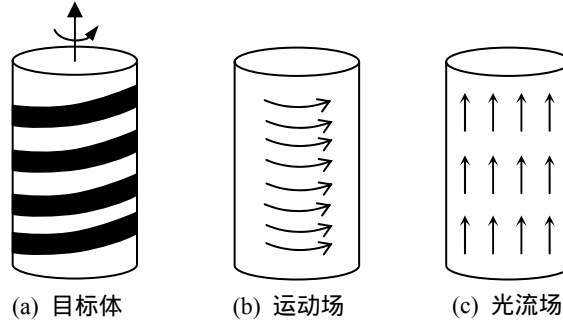


图 5.5.1 黑白螺旋条纹圆柱体的运动场和光流场

(2) 光流场的基本方程

基于光流场的运动检测的一个前提假设是：图像序列的采样时间间隔 Δt 很小，相邻两幅图像上同一物体的灰度值保持不变。设 t 时刻的光流图像为 $f(x, y, t)$ ，则

$$\frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (5.5.1)$$

但是在此时间间隔 Δt 上，图像上物体点从 (x, y) 位置移动到 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 。根据上述物体点灰度在运动前后保持不变的假设，可以得到下面的关系：

$$f(x, y, t) = f(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (5.5.2)$$

将 $f(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ 在 (x, y, t) 进行泰勒展开，得到

$$f(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = f(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t + O(\Delta x, \Delta y, \Delta t) \quad (5.5.3)$$

将式(5.5.3)代入式(5.5.2)可得

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t + O(\Delta x, \Delta y, \Delta t) = 0 \quad (5.5.4)$$

将上式两边除以 Δt ，并假设 $\Delta x, \Delta y$ 与 Δt 同阶，令 Δt 趋于 0 得到

$$f_x u + f_y v + f_t = 0 \quad (5.5.5)$$

其中 $f_x = \partial f / \partial x$ 、 $f_y = \partial f / \partial y$ 、 $f_t = \partial f / \partial t$ 、 $u = dx/dt$ 、 $v = dy/dt$ 。

这就是光流场的基本方程或称约束方程。这里 u, v 表示当前点的运动速度。 f_x, f_y, f_t 可以从图像序列中由相邻两时刻图像帧 $f(x_i, y_i, t_{k-1})$ 和 $f(x_i, y_i, t_k)$ ($i, j=0, 1, \dots, N-1$) 的四个

相邻点关于 x, y, t 的一阶差分的平均值来估计。

我们希望求出 u 和 v , 即对于图像中每一点的运动有两个未知数, 但却只有一个光流方程。显然只有这一个约束还不够, 可由图 5.5.2 来说明这个问题的原因。图 5.5.2(a)和(b)的时间间隔为 Δt , 图中的曲线是等灰度线。在没有其它约束信息的情况下, 我们无法知道图 5.5.2 (a)中的 A 点是对应于(b)中对应等灰度线上的 B 点还是 B' 点, 或者是这条线上的其它点。这是光流场理论中著名的开孔问题的一个例子。

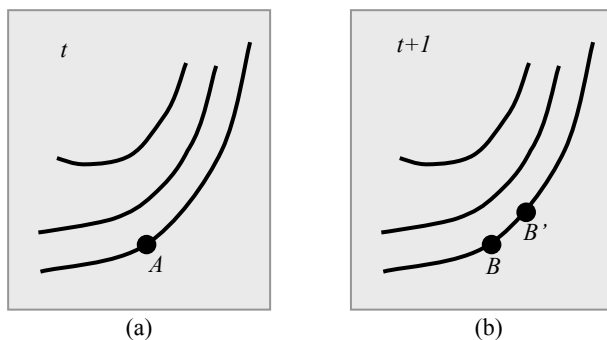


图 5.5.2 开孔问题的例子

显然对一个点用光流场基本方程求解 u 和 v 的条件是不够的, 必须引入其它附加约束才有可能唯一确定光流场。

5.5.2 光流场的计算方法

光流场的基本原理及约束方程简单直观, 但如何给出适应性广的求解基本方程的方法, 得到可靠、稳定的光流场结果, 却困难得多。已有许多这方面的研究成果, 这里仅简要介绍其中几种典型方法的基本思想。

(1) Horn-Schunck 方法^[19]

Horn 和 Schunck 使用在整个图像上光流是光滑变化的假设来求解光流, 即运动场既满足光流约束方程又满足全局平滑性。根据光流方程, 可以得到对光流的微分约束; 根据平滑性假设, 可以建立光流场的光滑性测度。将微分约束同光滑性测度组合起来, 并用变分法转化为偏微分方程进行光流场求解。

Horn-Schunck 方法是一种微分法, 算法实现相对简单, 计算复杂性较低。然而这种技术存在着严重的缺陷。首先, 图像灰度保持光滑假设对于许多自然图像序列都是不合适的, 尤其是在图像的遮合边缘处或当运动速度较快时, 基于灰度保持假设的基本方程(5.5.5)存在着较大误差。其次, 在图像的遮合区域, 速度场是突变的, 而总体平滑约束则迫使所估计的光流场平滑地穿过这一区域, 此过程平滑掉了有关物体形状的非常重要的

信息。最后，微分技术的一个要求是 $f(x, y, t)$ 必须是可微的，这暗示着需要对图像数据进行时空域平滑以避免混叠效应；而且数值微分的求取具有病态性，如果处理不当，将对最终的速度估计产生显著影响。

(2) 最小二乘估计方法^[19]

从上面的分析可知，对光流场基本方程求解 (u, v) 仅用一个像素点是不够的。因此要从相邻的两帧图像中，取具有相同速度的同一运动物体（可看成不带转动的刚体）上的 n 个不同位置的像素点。计算得到第 m 个像素位置上的 f_x, f_y, f_t 的估计值 $f_x^{(m)}, f_y^{(m)}, f_t^{(m)}$ ，将这些值代入光流场约束方程得到线性方程组，用最小二乘法可得到 (u, v) 的值。可以根据各像素距计算窗口中心的距离建立权重函数，使中心区域的影响比外围区域大，然后使用加权最小二乘法估计光流。

(3) 基于局部相位信息的光流场计算

以上介绍的几个方法都是建立在通过数值计算得到时空导数的基础上。在实际情况中，由于噪声的存在，这些导数很难从少数几幅图像中精确求得，因而这些方法都有一定的局限性。因此，有不少学者又提出了用其它的方法来计算光流。这些方法包括区域匹配法、频域法、时空域滤波法、基于能量的方法和基于局部相位场的光流法等^[20~22]。

基于局部相位场的光流计算方法由 Fleet 和 Jepson 提出，是目前国际上光流场研究的热点方向之一^[23~25]。相比于传统方法，该方法在计算精度和对旋转、缩放、仿射变形以及噪声影响的鲁棒性方面具有优势。

该方法首先用多个不同方向的三维 Gabor 滤波器在时空域对光流图像进行滤波，并利用滤波后的相位场建立基本约束方程和计算光流场。

1) 用三维 Gabor 滤波器对光流图像进行时空域滤波

光流图像 $f(x, y, t)$ 实际上是在时空域中的图像序列。以下将 (x, y) 记为向量 \mathbf{x} 。选用具有良好抗噪性能的三维 Gabor 滤波器

$$\text{Gabor}(\mathbf{x}, t; \mathbf{k}_0, \omega_0, C) = e^{i(\mathbf{x}, t) \cdot (\mathbf{k}_0, \omega_0)} G(\mathbf{x}, t; C) \quad (5.5.6)$$

其中 $e^{i(\mathbf{x}, t) \cdot (\mathbf{k}_0, \omega_0)}$ 为复指数， $G(\mathbf{x}, t; C)$ 为协方差阵为 C 的三维高斯函数。该 Gabor 滤波器的傅立叶变换为中心在 (\mathbf{k}_0, ω_0) 的三维高斯函数：

$$\mathcal{F}[\text{Gabor}(\mathbf{k}, \omega; \mathbf{k}_0, \omega_0, C)] = \hat{G}(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0, \omega - \omega_0; C) \quad (5.5.7)$$

用一组不同方向的 Gabor 滤波器对光流图像 $f(\mathbf{x}, t)$ 进行滤波，由于 Gabor 滤波器是复变量形式，因而滤波结果 $R(\mathbf{x}, t)$ 也为复变量形式，即

$$f(\mathbf{x}, t) * \text{Gabor}(\mathbf{x}, t; \mathbf{k}_0, \omega_0, C) = R(\mathbf{x}, t) \equiv \rho(\mathbf{x}, t)e^{i\varphi(\mathbf{x}, t)} \quad (5.5.8)$$

其中 $\rho(\mathbf{x}, t)$ 和 $\varphi(\mathbf{x}, t)$ 分别为 $R(\mathbf{x}, t)$ 的幅值和相位：

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sqrt{\text{Re}[R(\mathbf{x}, t)]^2 + \text{Im}[R(\mathbf{x}, t)]^2}, \quad \varphi(\mathbf{x}, t) = \text{Im}[\ln R(\mathbf{x}, t)] \quad (5.5.9)$$

2) 根据相位信息计算光流场

考虑上述滤波后的相位场，等相位线为

$$\varphi(\mathbf{x}, t) = c \quad (5.5.10)$$

其中 c 为实数。将上式对时间求导，得到本方法的基本约束方程：

$$\nabla \varphi(\mathbf{x}, t) \cdot (\mathbf{v}, 1) = 0 \quad (5.5.11)$$

其中 $\nabla \varphi(\mathbf{x}, t) = (\varphi_x, \varphi_y, \varphi_t)$ ，速度 $\mathbf{v} = (x_t, y_t) = (u, v)$ 。用图像坐标的一次多项式来近似局部速度场，即

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = (u, v) = (\alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y, \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y) \quad (5.5.12)$$

联立各个方向 Gabor 滤波器对光流图像滤波后得到的局部相位信息与速度间的基本约束方程式(5.5.11)，优化求解系数 α_0 、 α_1 、 α_2 和 β_0 、 β_1 、 β_2 ，就完成了光流场的计算。

5.5.3 从光流场计算刚体运动参数

一个刚体只有 6 个自由度，刚体上的光流场分布受此约束。反之，通过分析光流场的分布可以得到刚体的运动参数。为简化从光流场结果计算刚体运动的公式推导，如图 5.5.3 建立空间坐标系和图像坐标系。其中空间坐标系的原点在像机光心 C ，像机光轴为 CZ 轴， CX 、 CY 轴与图像坐标系的 Ox 、 Oy 轴分别平行。像机焦距为 1，图像平面在 $Z=1$ 处，图像坐标系原点在空间坐标系的 $(0,0,1)$ 处。这就相当于采用(2.1.33)的规一化图像坐标进行光流计算。

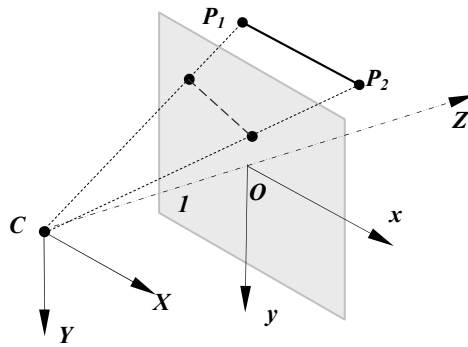


图 5.5.3 从光流场估计刚体运动的空间坐标系和图像坐标系

设空间点 P 的坐标为 (X, Y, Z) ，对应像点坐标为 (x, y) ，光流速度为 (u, v) 。根据中心投影关系，有

$$\begin{cases} X = xZ \\ Y = yZ \end{cases} \quad (5.5.13)$$

将该式对时间求导数得到

$$\begin{cases} X' = \frac{dX}{dt} = \frac{dx}{dt}Z + x\frac{dZ}{dt} = uZ + xZ' \\ Y' = \frac{dY}{dt} = \frac{dy}{dt}Z + y\frac{dZ}{dt} = vZ + yZ' \end{cases} \quad (5.5.14)$$

(X', Y', Z') 即为 P 点的运动矢量。对于刚体上任意两点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ ，它们之间的距离在运动前后保持不变，即

$$\begin{aligned} (X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2 = \\ (X_1 + X_1'dt - X_2 - X_2'dt)^2 + (Y_1 + Y_1'dt - Y_2 - Y_2'dt)^2 + (Z_1 + Z_1'dt - Z_2 - Z_2'dt)^2 \end{aligned} \quad (5.5.15)$$

展开得

$$\begin{aligned} 2(X_1 - X_2)(X_1' - X_2') + (X_1' - X_2')^2 dt + 2(Y_1 - Y_2)(Y_1' - Y_2') + (Y_1' - Y_2')^2 dt \\ + 2(Z_1 - Z_2)(Z_1' - Z_2') + (Z_1' - Z_2')^2 dt = 0 \end{aligned} \quad (5.5.16)$$

其中 dt 是时间的微小变化量，因而得到

$$(X_1' - X_2')(X_1 - X_2) + (Y_1' - Y_2')(Y_1 - Y_2) + (Z_1' - Z_2')(Z_1 - Z_2) = 0 \quad (5.5.17)$$

将式(5.5.13)和式(5.5.14)代入式(5.5.17)，得到

$$aZ_1^2 + bZ_2^2 + cZ_1Z_2 + dZ_1'Z_1 + eZ_2'Z_1 + eZ_1'Z_2 + fZ_2'Z_2 = 0 \quad (5.5.18)$$

其中的系数 $a \sim f$ 由图像点坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和光流场计算结果 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 组成。

刚体运动可以看作三维平移和三维旋转的合成。设平移运动速度矢量为 $\mathbf{T} = (T_1, T_2, T_3)^T$ ，绕轴旋转速度为 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ 。则点 $P(X, Y, Z)$ 的运动矢量 $P'(X', Y', Z')$ 为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \boldsymbol{\omega} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (5.5.19)$$

展开为

$$\begin{cases} X' = \omega_2 Z - \omega_3 Y + T_1 \\ Y' = \omega_3 X - \omega_1 Z + T_2 \\ Z' = \omega_1 Y - \omega_2 X + T_3 \end{cases} \quad (5.5.20)$$

将式(5.5.13)代入(5.5.20)的第三式，得到

$$Z' = \omega_1 y Z - \omega_2 x Z + T_3 \quad (5.5.21)$$

将该式代入式(5.5.18)，得到

$$(a - dx_1 \omega_2 + dy_1 \omega_1) Z_1^2 + (b - fx_2 \omega_2 + fy_2 \omega_1) Z_2^2 + [c - e(x_1 + x_2) \omega_2 + e(y_1 + y_2) \omega_1] Z_1 Z_2 + (d + e) T_3 Z_1 + (f + e) T_3 Z_2 = 0 \quad (5.5.22)$$

图像坐标和光流速度已经得到，因此上式中有 Z_1 、 Z_2 、 T_3 、 ω_1 、 ω_2 5 个未知量。每增加一个点都可以和已有的各点分别建立一个形如式(5.5.22)的方程，而只增加一个未知量 Z_i 。如果没有任何绝对尺度信息，例如刚体上某两点间距离已知或某点的深度信息 (Z 坐标值) 已知等，则只能在相差一个尺度因子的意义下得到结果。而如果有一个特征点的 Z 坐标值已知，则在刚体上选取 4 个或 4 个以上特征点，每两点建立一个形如式(5.5.22)的方程，可以建立 6 个或 6 个以上方程，从而求解 T_3 、 ω_1 、 ω_2 和 Z_i ，进而可以计算 X_i 、 Y_i 、 X'_i 、 Y'_i 、 Z'_i 和 T_1 、 T_2 、 ω_3 。

5.6 目标运动轨迹预测与多目标跟踪

利用前述的相关跟踪、数字减影和模式识别等多种方法都可以完成对图像序列中的运动目标的跟踪测量。但如果没有任何先验知识，需要对每幅图像在全场范围内进行目标搜索。若假设拍摄图像的时间间隔较短，目标在相邻图像上不会运动太远，当前目标应该在前幅图目标位置的某一个邻域内，则可以将目标搜索区域限制在以前幅图目标位置为中心的一个局部窗口内，从而大大提高搜索速度。这种窗口尺寸不容易事先估计，通常应选取有较大冗余量的窗口。应当注意的是，当图像是用经纬仪拍摄的时，由于目标和经纬仪角度都在运动，前后图像上目标可能相距很远，则需要先结合相邻时刻间经纬仪拍摄角度的变化量来确定搜索区域。

事实上，空间运动目标的运动是连续的、有规律的，例如空中无源炮弹的运动是一种带初速度的自由落体运动。无论是机动的（有源的）还是非机动的目标，都可以在一定范围内用某种数学模型来近似描述它的运动。因此我们可以根据目标运动已发生的状态，来预估其将要发生的状态，再结合摄像机或经纬仪的运动状态，对目标在图像上将要出现的位置进行预测，引导对目标的匹配跟踪。目标运动轨迹预测是图像序列目标跟

踪的重要的、常用的配合方法，对提高图像序列目标跟踪的速度和可靠性有极大的好处，主要体现在：

第一，通过较准确的目标轨迹预测，可将搜索窗口限制在一个很小的范围，从而可以减小计算量，提高搜索的速度；

第二，当图像中有多个相似搜索目标时，分别对各个目标进行运动轨迹预测，能够更方便和可靠地将当前图的多个目标与前幅图的各个目标正确匹配；

第三，图像中有可能出现与目标特征相似的噪声或其它物体时，利用目标运动轨迹预测，可以方便地将目标与其它物体区别开来。除了考虑形状和灰度分布的相似性，通常可定义与预测位置最接近的物体就是要找的目标。

目标运动轨迹预测主要涉及到多种跟踪滤波器、数据关联和跟踪门技术，是一个专门的研究方向，已有大量的研究成果，例如卡尔曼滤波、维纳滤波、多种非线性滤波、以及将在 5.7 节介绍的多项式最优滤波等^[26]。这里只简单介绍运动轨迹预测常用的卡尔曼滤波的基本过程。卡尔曼滤波器被广泛用于目标跟踪，如果系统是线性的，在最小均方误差准则下，卡尔曼滤波器可以提供最优的跟踪性能^[27]。

5.6.1 卡尔曼滤波目标运动轨迹预测基本原理

(1) 目标运动模型

为了应用卡尔曼滤波进行运动轨迹预测，首先需要建立目标运动模型，即状态方程和观测方程。设目标做恒加速运动，在 t 时刻的位置坐标为 $\mathbf{x}(t)$ ，则该目标的运动可由下面的方程来描述^[28]：

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = 0 \quad (5.6.1)$$

其中 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 表示对时间求三次导数。记加速度 $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 为 $\mathbf{a}(t)$ ，速度 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 为 $\mathbf{v}(t)$ 。定义目标运动状态向量为 $\mathbf{X}(t)=[\mathbf{x}(t), \mathbf{v}(t), \mathbf{a}(t)]^T$ 。对上式积分可得到描述时间间隔为 Δt 的 t_{k-1} 和 t_k 时刻状态向量之间关系的状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} \quad (5.6.2)$$

其中 \mathbf{X}_{k-1} 和 \mathbf{X}_k 分别表示 t_{k-1} 和 t_k 时刻的状态， $\Phi_{k,k-1}$ 为从 t_{k-1} 时刻状态变化到 t_k 时刻状态的状态转移矩阵。根据恒加速运动位置、速度、加速度之间的关系：

$$\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_{k-1}, \quad \mathbf{v}_k = \mathbf{v}_{k-1} + \mathbf{a}_{k-1} \Delta t, \quad \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1} \Delta t + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{k-1} \Delta t^2 \quad (5.6.3)$$

因而状态转移矩阵为

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6.4)$$

实际测量中,加速度会受到各种噪声等因素的干扰。若设第 $k-1$ 个时间间隔加速度的零均值白噪声为 \mathbf{W}_{k-1} , 其均方差为 σ_w , 则 \mathbf{W}_{k-1} 引起的速度增量为 $\mathbf{W}_{k-1}\Delta t$, 引起的位移增量为 $\mathbf{W}_{k-1}\Delta t^2/2$ 。因此考虑系统动态噪声(加速度噪声)的恒加速运动可用下面的状态方程来描述:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1}\mathbf{W}_{k-1} \quad (5.6.5)$$

其中

$$\Gamma_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 & \Delta t & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6.6)$$

对于二维图像序列, t_k 时刻的观测值为目标的二维图像坐标 $\mathbf{Y}_k = [\hat{x}_k \ \hat{y}_k]^T$, 观测数据的零均值白噪声为 $\mathbf{V}_k = [e_{xk} \ e_{yk}]^T$, 即

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{xk} \\ e_{yk} \end{bmatrix} \quad (5.6.7)$$

而状态向量为 $\mathbf{X}_k = [x_k \ y_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \ddot{x}_k \ \ddot{y}_k]^T$ 。将(5.6.7)记为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (5.6.8)$$

其中

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6.9)$$

式(5.6.8)即为描述 t_k 时刻观测值与目标状态之间关系的观测方程, 其中 \mathbf{Y}_k 为观测值, \mathbf{V}_k 为 t_k 时刻的观测数据的零均值白噪声, 均方差为 σ_v , \mathbf{H}_k 称为观测矩阵。

(2) 标准卡尔曼滤波

上述的状态方程和观测方程都是线性的, 可以采用标准卡尔曼滤波器进行预测, 给出最小均方误差意义下最优的预测结果^[27]。卡尔曼滤波主要有以下计算步骤。

1) 一步状态值预测

一步状态值预测通过第 $k-1$ 时刻的 \mathbf{X}_{k-1} 、 \mathbf{W}_{k-1} 和前面 $k-1$ 个时刻观测值的合集 $\mathbf{Y}(k-1)$ 计算第 k 时刻状态 \mathbf{X}_k 的预测值 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 。根据状态方程(5.6.5), 基于 $\mathbf{Y}(k-1)$ 对 \mathbf{X}_k 的最小线性均方误差估计为

$$\hat{\mathbf{X}}_{i|k-1} = \Phi_{k,k-1}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1}E(\mathbf{W}_{k-1} | \mathbf{Y}(k-1)) \quad (5.6.10)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 为前一次的滤波值（或初值）， $E(\mathbf{W}_{k-1} | \mathbf{Y}(k-1))$ 表示在给定 $\mathbf{Y}(k-1)$ 时 \mathbf{W}_{k-1} 的数学期望。由于 \mathbf{W}_{k-1} 为零均值白噪声， $\mathbf{Y}(k-1)$ 与 \mathbf{W}_{k-1} 不相关，所以 $E(\mathbf{W}_{k-1} | \mathbf{Y}(k-1))=0$ 。因而得到一步状态值预测结果为

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (5.6.11)$$

2) 一步观测值预测

一步观测值预测通过前面 $k-1$ 个时刻的观测值 $\mathbf{Y}(k-1)$ 计算第 k 时刻观测值 \mathbf{Y}_k 的预测值 $\hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1}$ 。根据观测方程(5.6.8)，基于 $\mathbf{Y}(k-1)$ 对 \mathbf{Y}_k 的最小线性均方误差估计为

$$\hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + E(\mathbf{V}_k | \mathbf{Y}(k-1)) \quad (5.6.12)$$

由于 $\mathbf{Y}(k-1)$ 与 \mathbf{V}_{k-1} 不相关，所以 $E(\mathbf{V}_k | \mathbf{Y}(k-1))=0$ 。并且代入一步状态值预测结果，得到一步观测值预测结果为

$$\hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (5.6.13)$$

3) \mathbf{Y}_k 的新息分量

\mathbf{Y}_k 的新息分量即第 k 时刻实际观测值相对于预测观测值所新增的信息量，定义为实际观测值与预测观测值之差

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{k|k-1} = \mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1} \quad (5.6.14)$$

代入测量值预测结果，得到

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{k|k-1} = \mathbf{Y}_k - \mathbf{H}_k \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (5.6.15)$$

4) 状态估计误差协方差阵预测

第 k 时刻状态 \mathbf{X}_k 的估计误差协方差阵为

$$\mathbf{P}_k = E\left[(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k)(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k)^T\right] \quad (5.6.16)$$

其中 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为对 \mathbf{X}_k 的估计结果。根据第 k 时刻状态值的预测结果，预测第 k 时刻状态估计误差协方差阵为

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = E\left[(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})^T\right] = E(\tilde{\mathbf{X}}_{k|k-1} \tilde{\mathbf{X}}_{k|k-1}^T) \quad (5.6.17)$$

其中 $\tilde{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 为 \mathbf{X}_k 的新息分量。代入状态方程和状态值预测结果，得到状态估计误差协方差阵预测结果的递推公式：

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} \sigma_w^2 \Gamma_{k,k-1}^T \quad (5.6.18)$$

5) 当前状态的最优估计

根据当前时刻（第 k 个时刻）以及前面 $k-1$ 个时刻的观测结果估计当前状态，即

$$\hat{\mathbf{X}}_k = E[\mathbf{X}_k | \mathbf{Y}(k)] \quad (5.6.19)$$

根据数学中的正交投影定理，得到

$$\hat{\mathbf{X}}_k = E[\mathbf{X}_k | \mathbf{Y}(k-1)] + E(\tilde{\mathbf{X}}_{k|k-1} | \tilde{\mathbf{Y}}_{k|k-1}) \quad (5.6.20)$$

其中 $E[\mathbf{X}_k | \mathbf{Y}(k-1)]$ 就是对 \mathbf{X}_k 的预测值 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ ， $\tilde{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 和 $\tilde{\mathbf{Y}}_{k|k-1}$ 为 \mathbf{X}_k 和 \mathbf{Y}_k 的新息分量。代入状态值和测量值预测结果，得到当前状态的最优估计的递推公式：

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{Y}}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Y}_k - \mathbf{H}_k \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}) \quad (5.6.21)$$

其中

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \sigma_v^2)^{-1} \quad (5.6.22)$$

\mathbf{K}_k 称为滤波增益矩阵，它的作用是对观测值的新息分量 $\tilde{\mathbf{Y}}_k$ 进行加权，作为在一步预测结果基础上对第 k 时刻状态进行最优估计的增益。

6) 计算当前状态估计误差协方差阵

根据式(5.6.16)和(5.6.17)，并代入状态值和测量值预测结果，得到计算当前状态估计误差协方差阵的递推公式

$$\mathbf{P}_k = (1 - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (5.6.23)$$

其中 \mathbf{K}_k 是滤波增益矩阵式(5.6.22)。

(3) 用标准卡尔曼滤波对目标运动进行预测和滤波的步骤

利用标准卡尔曼滤波按以下步骤对目标运动进行预测和滤波：

- 1) 给定目标状态及其协方差阵的初始值 \mathbf{X}_k 和 \mathbf{P}_k ， $k=0$ ；
- 2) 令 k 递增，即 $k=k+1$ ，按式(5.6.11)预测当前状态 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ ；
- 3) 按式(5.6.18)预测当前状态估计误差协方差阵 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ ；
- 4) 按式(5.6.22)计算滤波增益矩阵 \mathbf{K}_k ；
- 5) 按式(5.6.21)计算当前状态的最优估计 $\hat{\mathbf{X}}_k$ ；
- 6) 按式(5.6.23)计算当前估计误差协方差阵 \mathbf{P}_k ，重复步骤 2)~6)，继续对下一时刻进行预测和滤波。

可见，卡尔曼滤波首先根据前面时刻的状态预估当前时刻的状态，再根据观测值对预估结果进行校正，得到最优的估计结果。而且由于采用递归推算的方式，使得卡尔曼

滤波在实际应用中很容易实现。除了上述介绍的针对线性系统的标准卡尔曼滤波，还有应用于非线性系统的扩展卡尔曼滤波、酉滤波等，这里不再赘述。

5.6.2 多目标跟踪技术^[29,30]

在多弹头武器试验的光测，车辆、人员等多目标视频监控等任务中，需要对序列图像中的多目标进行自动匹配、跟踪和测量。本节所说的多目标指多个几何、灰度特征都相似的目标。

多目标的匹配跟踪与前面论述的单目标的匹配跟踪技术有许多不同的新特性。例如，在有多个目标的单像机序列图像中，需要确定前后图像中的各个目标之间的对应关系；在同时刻多站多像机的多目标图像中，需要确定不同像机拍摄图像中各个目标的对应关系。前者主要是单目在时域上的多目标匹配问题，后者主要是多目在空域上的多目标匹配问题。实际中，通常是采用将两者结合的时空域联合的多目标匹配方法技术。当多目标的几何或灰度特性有差异时，还应结合目标特性进行匹配。本节简要介绍单目序列图像多目标匹配跟踪算法的基本思路。而多目图像在空域上的多目标匹配将在第七章中介绍。

多目标跟踪算法可分为跟踪起始和跟踪维持两个阶段，其中还应注意对目标的添加、减少、重叠、遮挡等特殊情况的处理。

(1) 多目标跟踪起始

多目标跟踪起始主要指在跟踪的起始阶段确定目标的数目和位置，并对多目标的运动轨迹初始化，这也就是单像机多目标在时域上的匹配阶段。通常采用多帧延迟判决法对多目标运动轨迹进行初始化。如图 5.6.1，横轴为时间轴 t ，这里用图像序号表示；纵轴 x 表示目标点在图像上的位置。使用序列图的起始若干帧（此处以 5 帧为例）进行起始跟踪。图中每条竖线上的若干黑点表示该时刻对应图像上的目标（以 3 个为例，这里不同帧图像上相同标号的目标点并不代表是同一目标）。

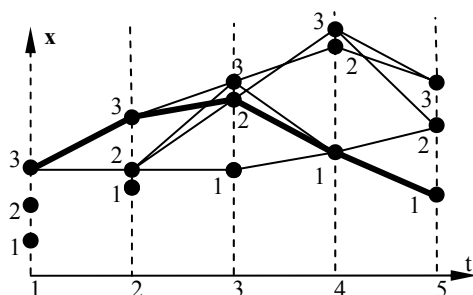


图 5.6.1 采用多帧延迟判决法初始化多目标运动轨迹

以确定第一帧图像上 3 号目标点的轨迹为例。首先根据先验知识，例如目标的运动规律，划定第 2 帧图像上的某区域的各点为第 1 帧图像 3 号目标点的候选对应点。此例中为第 2 帧图像上的 2、3 号点，若无可依据的先验知识，则只能认为第 2 帧图像上所有各点都可能为其对应点。再同法判断第 2 帧图像上各可能点在第 3 帧图像上的候选对应点，照此做到第 5 帧图像。由此可得到第 1 帧图的 3 号点在前 5 帧图像中的所有可能轨迹，如图中从第 1 帧图 3 号点到第 5 帧图像上各点的折线所示。例如图中最粗的一条折线即示例了一种可能轨迹 $3 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 1$ 。其它各目标以同法确定其可能轨迹。

依据各目标点在各帧图像中对应的性质，及所得到的各可能轨迹，可以得到若干种可能的各帧图像目标点的对应方式。例如无动力的空中飞行目标的运动轨迹可近似为小曲率的二次曲线，则可以用上面所得的各条可能轨迹拟合二次曲线，求出每个目标点的每条可能轨迹与其拟合曲线之间的偏差。选择可信度最高，也就是总体偏差最小的图像间目标点对应关系确定为起始轨迹。

(2) 多目标跟踪维持

多目标跟踪起始段完成后，即完成轨迹初始化后，转入多目标跟踪维持阶段。多目标跟踪维持是指在后续阶段对多目标保持连续跟踪。选用卡尔曼最邻近法或其它改进方法进行。卡尔曼最邻近法首先根据轨迹初始化的结果，计算起始跟踪阶段最后一帧图像上每个目标的位置、速度和加速度，然后由各目标的位置、速度和加速度信息，采用前述的卡尔曼滤波器预测各目标在下一帧图像上的位置。以此预测位置为中心，按某门限值划定目标在下一帧图像上可能出现的范围（跟踪门）。在此范围内搜索目标，除了根据目标的形状、灰度信息进行判断外，以与预测位置最邻近的搜索结果作为匹配目标点。

(3) 特殊情况处理

通常多目标不会保持同步，并可能出现新目标进入视场（目标增加）、原有目标点出离视场或虽未出离视场但由于种种原因已无法继续跟踪（目标减少）的情况。而且由于轨迹交叉、目标重叠和遮挡等，会导致个别目标的暂时丢失和再次出现。

当某一帧图像中按卡尔曼最邻近法匹配后，出现符合目标特征但没能够与前面时刻的目标匹配成功的“多余”点时，可对其先结合后续的若干图像，按起始跟踪的方法确定起始轨迹，同时继续用卡尔曼最邻近法跟踪已有目标。将新轨迹与已有目标轨迹比较，如有相同，则新轨迹对应的并非新增目标，而是已有目标；如新轨迹与已有目标轨迹都不同，则新轨迹对应新增目标，目标数目增加。此后，对所有目标用卡尔曼最邻近法进

行跟踪。

如果某帧图像上某目标在跟踪门内没有目标点，则暂时放过该帧图像，而在下一帧图像上扩大该目标的跟踪门，若仍无目标出现，则目标减少；而如果再次匹配到目标，则可能是目标在上一时刻被遮挡或暂时出离视场。如果某帧图像上某目标点的跟踪门内出现的目标点都已有其它目标点相匹配，则仍取最邻近预测位置的目标点为对应目标点，继续跟踪下一帧图像，若仍出现此种情况，则目标减少。如果某目标点的预测位置在图像范围之外，则仍按该图像外的预测位置来划定下一帧图像上目标点的跟踪门，若仍找不到匹配点，则目标减少。

若当前帧上有两个目标的跟踪门内都只有同一个测量点，则认为两目标轨迹交叉，位置重合，将该点与这两个目标匹配。

上面简介了单目像机多目标匹配跟踪的最基本的一些策略，实际应用中常会有更复杂的情况，必须研究更综合性的策略。在第十二章中将介绍我们的多像机多目标匹配跟踪的策略、方法和应用实例，联合单像机时间序列图像多目标匹配和在空间上利用多像机之间的极线约束进行的多目标匹配，在时空域上可靠实现多像机多目标的匹配跟踪。

5.7 数据平滑与速度、加速度计算

用摄像测量方法对序列图像处理测量得到的是各个时刻目标在图像中或在空间中的位置和姿态结果。由于序列图像加入了一维时间轴信息，信息量大为增加，为了提高测量数据结果的可靠性和精度，我们可以对各时刻分别得到的定位和测量结果加入时间轴约束，进行平滑滤波，并剔除粗大误差。

此外，用摄像测量方法得到的位置和姿态结果都是零阶量，而许多应用中我们更关心目标运动的速度和加速度。这就需要对零阶量在时间轴上进行一阶和二阶微分，得到相应的一阶和二阶量，即速度和加速度。我们知道，微分是对噪声非常敏感的运算，采用怎样的数据处理方法和算法将位置和姿态对图像拍摄时间进行一阶和二阶微分，对于保证目标运动的速度和加速度的测量精度至关重要。

本节介绍数据平滑滤波与速度、加速度计算中常用的白噪声观测数据多项式最优滤波，及其估计轨迹、速度、加速度的方法，并介绍实际观测数据处理中常用的滑动窗口拟合原理。

5.7.1 白噪声观测数据多项式最优滤波^[31]

通过序列图像分析提取目标或测量了目标的位置、姿态参数后，需要通过平滑与滤

波，抑制噪声影响并得到速度、加速度测量结果。前述的卡尔曼滤波器属于为具体任务专门设计的专用滤波器，对于能够用精确动力学方程描述的运动，卡尔曼滤波一般是最优的线性滤波器。而多项式滤波器用多项式来近似目标的运动轨迹，可以在多种情况下应用，属于通用滤波器^[32]。白噪声多项式最优滤波是最常用的一种多项式滤波器。

设 t_i ($i=1,2,\dots,N$, N 为时间维度上滤波窗口的宽度) 时刻对信号 $s(t_i)$ 的观测值为

$$x_i = s(t_i) + \varepsilon(t_i) = \sum_{j=0}^k a_j p_j(t_i) + \varepsilon(t_i) \quad (5.7.1)$$

其中 $\varepsilon(t_i)$ 为零均值白噪声。严格地说，实际数据可能还含有系统误差，这里暂不作考虑。将真实信号 $s(t_i)$ 用一组时间函数的正交多项式族 $p_j(t_i)$ 的线性组合表示。设相邻图像时间间隔为 h ，取正交多项式族为

$$\begin{cases} p_0(t) = 1, & p_1(t) = t - \frac{N+1}{2}h, \\ p_{j+1}(t) = p_1(t)p_j(t) - \frac{j^2(N^2 - j^2)}{4(4j^2 - 1)}h^2 p_{j-1}(t); & j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (5.7.2)$$

根据最小二乘原理，通过最小化 $\sum_{i=1}^N (s(t_i) - x_i)^2$ ，对系数 a_j 进行最小二乘估计为

$$\hat{a}_j = \sum_{i=1}^N \frac{x_i p_j(t_i)}{S(N, j)}, \quad j = 0, 1, \dots, k \quad (5.7.3)$$

其中 $S(N, j) = \sum_{i=1}^N p_j^2(t_i)$ 。因而 $s(t)$ 的最优估计为

$$\hat{s}(t) = \sum_{j=0}^k \left(\sum_{i=1}^N \frac{x_i p_j(t_i)}{S(N, j)} \right) p_j(t) = \sum_{j=0}^k \sum_{i=1}^N \frac{x_i p_j(t_i) p_j(t)}{S(N, j)} \quad (5.7.4)$$

对上式在第 $N+\alpha$ 时刻对时间 t 计算 L 阶微分 (L 为非负整数)：

$$\left. \frac{d^L \hat{s}(t)}{dt^L} \right|_{N+\alpha} = \sum_{j=0}^k \sum_{i=1}^N \frac{x_i p_j(t_i)}{h^L S(N, j)} \cdot \left. \frac{d^L p_j(t)}{dt^L} \right|_{N+\alpha} \quad (5.7.5)$$

记

$$\hat{s}_{N+\alpha}^{(L)} \equiv \left. \frac{d^L \hat{s}(t)}{dt^L} \right|_{N+\alpha}, \quad p_j^{(L)}(N+\alpha) \equiv \left. \frac{d^L p_j(t)}{dt^L} \right|_{N+\alpha} \quad (5.7.6)$$

可以看到，当 $j < L$ 时， $p_j^{(L)}(N+\alpha) = 0$ ，从而 $s(t)$ 在第 $N+\alpha$ 时刻对时间 t 的 L 阶微分

的最优估计为

$$\hat{s}_{N+\alpha}^{(L)} = \sum_{i=1}^N \omega_{N-i} x_i \quad (5.7.7)$$

其中 $\omega_{N-i} \equiv \sum_{j=L}^k \frac{p_j(t_i) p_j^{(L)}(N+\alpha)}{h^L S(N, j)}$ 为正交多项式滤波的权系数。

当 $\alpha < 0$ 时，表示对 N 个时间点内某一时刻的数据的平滑； $\alpha = 0$ 时，表示对端点（第 N 时刻）数据的滤波； $\alpha > 0$ 时，表示对第 N 时刻以后某一时刻数据的预测。当 $L = 0$ 时，得到轨迹结果； $L = 1$ 时，得到速度结果； $L = 2$ 时，得到加速度结果。

5.7.2 滤波结果的方差估计

为衡量上述滤波的效果，常应用方差比的概念，即取平滑滤波后输出数据的随机误差方差与输入观测数据的随机误差方差之比 μ^2 。例如输入的观测数据为目标在图像中的位置，误差方差为 σ_0^2 ，输出的滤波结果为目标在图像中的运动速度，误差方差为 σ_1^2 ，如果方差比为 μ^2 （单位： $1/\text{秒}^2$ ），则速度计算结果的误差方差与位置定位误差方差的关系为 $\sigma_1^2 = \mu^2 \cdot \sigma_0^2$ 。

设滤波窗口宽度为 N （即参加滤波的时间点数），相邻时刻的时间间隔为 h ，采用 k 次多项式对参数的 L 阶时间微分进行最小二乘拟合。则滤波方差比为

$$\mu^2 = \frac{1}{h^{2L}} \sum_{j=L}^k \frac{[p_j^{(L)}(N+\alpha)]^2}{S(N, j)} \quad (5.7.8)$$

对于轨迹平滑， $L = 0$ ，方差比没有单位，而对于速度或加速度平滑， $L = 1$ 或 $L = 2$ ，方差比的单位分别为 $(1/\text{秒}^2)$ 和 $(1/\text{秒}^4)$ 。这样，就可以根据滤波窗口宽度、相邻时刻时间间隔、拟合多项式的次数，以及各时刻目标在图像中或在空间中的位置和姿态结果对观测数据进行平滑，计算运动速度、加速度，并根据单个时刻目标图像定位或位置姿态测量的精度水平估计目标轨迹、速度、加速度滤波结果的精度水平。需要注意的是，上述处理过程假设了目标运动轨迹为 k 次多项式，并作为约束条件。而如果目标实际运动轨迹与 k 次多项式之间存在偏差，也就意味着滤波方法存在模型误差，会影响输出数据的精度。

当对观测数据进行事后处理时，应对滤波窗口中心的数据进行平滑处理，输出结果的精度最好。而对于实时测量任务，无法同时用前、后时刻的数据对当前数据进行平滑，而只能用前面时刻和当前时刻的数据对当前数据（ N 宽度窗口的第 N 个时刻）进行平滑处理，此时滤波结果精度可能会劣于窗口中心滤波结果。

5.7.3 滑动窗口拟合与粗差剔除

上述多项式最优滤波过程是假设目标轨迹在一个时间窗口内为时间的多项式。对于目标在较短时间内的运动轨迹，一般可以由时间的多项式很好地近似。但由于各种干扰因素的存在，目标长时间运动的实际轨迹很难严格地用时间的多项式来描述。并且时间窗口越长，实际目标轨迹与时间多项式之间的偏差就可能越大，会给多项式最优滤波结果带来更大的误差。因此，应该综合考虑这一模型误差和影响滤波方差比的各种因素，选择合适宽度的时间窗口。

以实时测量中，用前面时刻和当前时刻的数据对当前数据进行滤波为例，在确定时间窗口宽度 N 和滤波方法后，按下面的方法进行滑动窗口拟合并剔除粗大误差，以得到高精度的处理结果。

1) 第 1 到第 $N-1$ 时刻，用已得到的所有数据采用多项式拟合等方法进行滤波处理，得到当前结果；此阶段由于参加滤波处理的数据点比较少，结果精度会比较低，如果允许，此阶段可不输出结果数据。

2) 第 N 时刻以后，用它前面 $N-1$ 个时刻的数据和当前时刻数据共同进行滤波处理，得到当前结果。此过程相当于用一个宽度为 N 的窗口在目标轨迹上逐时刻地从头至尾“滑动”，如图 5.7.1。

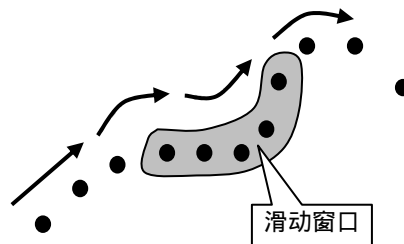


图 5.7.1 滑动窗口拟合示意图

3) 在对滑动窗口进行滤波过程中，如果有个别观测数据与滤波拟合轨迹的偏离量超过事先设定的阈值，则将该观测数据剔除，再用剔除粗差后剩余的观测数据进行滤波；也可以按一定比例剔除偏离拟合轨迹较远的观测数据，如第一次滤波后剔除偏离拟合轨迹最远的 3% 的观测数据，再用剩余观测数据进行滤波。在保证剩余的观测数据量足够多的前提下，此处理过程可以重复多次。通过这一剔除粗差的处理，可以抑制误差较大甚至错误的观测数据对滤波处理结果带来的不利影响。

参考文献

- [1] 徐建华. 图像处理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [2] 张小虎, 于起峰. 高速摄影图像运动检测与分析的相减方法[J]. 湖南大学学报, 1997, 24(5).
- [3] Rosin P L, Ellis T. Image difference threshold strategies and shadow detection[C]. 6th British Machine Vision Conf., Birmingham, 1995, 347-356.
- [4] 杨志华, 曾禹村. 背景移动补偿技术的研究[J].北京理工大学学报,2000,20(3): 333-337.
- [5] 张小虎. 靶场图像运动目标检测与跟踪定位技术研究[D]. 国防科学技术大学博士学位论文, 2006.12.
- [6] Zhang Xiaohu, Yu Qifeng etc. A New Method for Moving Target Detection Based on Positive and Negative Difference Maps[C]. International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization. 2005.8.
- [7] 章毓晋 编著. 图像处理和分析[M]. 北京 : 清华大学出版社, 1999.
- [8] 尚洋, 于起峰, 陆宏伟. 圆形对角标志自动识别与精确定位[C]. 全国光电技术学术交流会, 2002.
- [9] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [10] DeAngelis, G.C., Ohzawa, I., Freeman, R.D. Receptive field dynamics in the central visual pathways[J]. Trends in Neurosciences, 1995,18(10): 451-458.
- [11] Olshausen, B., Anderson, C., Van Essen, D. A Neural Model of Visual Attention and Invariant Pattern Recognition[C]. CNS memo 18, 1992.
- [12] Fukunaga K and Hostetler L D. The estimation of the gradient of a density function with application in pattern recognition[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1975(21): 32-40.
- [13] Cheng Y. Mean Shift, mode seeking, and clustering[J]. IEEE Trans. on Pattern Anal,1995, 17(8): 790-799.
- [14] Comaniciu D and Meer P. Mean Shift: A robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Trans. Pattern Anal, 2002, 24(5): 603-619.
- [15] 张恒, 李由, 李立春, 于起峰. 基于差异性加权的 Mean Shift 跟踪方法[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 404-407.
- [16] Heng Zhang, Lichun LI, You LI, Qifeng Yu. A scale rotation adaptive new Mean Shift tracking method[C]. Photonics Asia 2007 Conference and Exhibition, 2007(6833): 68330S-1-68330S-8.
- [17] 孙即祥等. 现代模式识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 31-34.
- [18] 王润生. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.
- [19] Horn B. Robot vision[M]. Cambrige: Mit Press, 1986.
- [20] Singh A. An estimation-theoretic framework for image-flow computation[C]. Proc.of 3rd Int Conf. on Computer Vision, 1990.
- [21] Fleet D J, Jepson A D. Computation of normal velocity from local phase information[C]. Proc of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 1989.
- [22] David J. Heeger. Optical flow using spatiotemporal filters[J]. International journal of computer vision, 1988, 3(3): 279-302.
- [23] David J. Fleet, Allan D. Jepson. Computation of component image velocity from local phase information[J]. International journal of computer vision, 1990, 5(1): 77-104.
- [24] Temujin Gautama, Marc M, Van Hulle. A phase-based approach to the estimation of the optical flow field

- using special filtering[J]. IEEE transactions on neural networks, 2002, 13(5): 1127-1137.
- [25] Alireza Bab-Hadiashar, David Suter. Robust optical flow computation[J]. International journal of computer vision, 1998, 29(1): 59-77.
- [26] 刘利生,魏国省,张纪生. 数字滤波器的一般原理和靶场现用滤波器的述评[J]. 飞行器测控技术, 1996(1): 26-96.
- [27] 刘福声, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社,1999.
- [28] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [29] 周宏仁 等. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [30] 熊国清. 序列图像多目标跟踪问题的研究[D]. 国防科学技术大学硕士学位论文, 2001.1.
- [31] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [32] AD 报告 A240984. General principles of digital filtering and a survey of filters in current range use. 1991.9.

第六章 体目标三维位置姿态参数测量

前面几章介绍的摄像测量原理和方法大都是将目标作为点目标，或者是物体上有许多点，而没有利用这些点之间的约束关系。在实际中，我们常需要测量物体相对于摄像机的相对位置和姿态。点目标是没有姿态的，只有当目标是具有六自由度（三个位置分量和三个角度分量）的体目标时，才具有测量物体姿态的可能。通常在物体上建立坐标系，或物体在某坐标系下的六自由度已知，从而测量物体坐标系相对于摄像机坐标系之间的关系，得到物体在像机坐标系下的三维位置和姿态。本章介绍体目标三维位置、姿态参数测量的基本原理与常用方法。

6.1 PNP 问题

6.1.1 PNP (Perspective-N-Points) 问题的描述

PNP 问题 (N 点透视问题, Perspective-N-Points) 是计算机视觉、摄影测量、射影几何中研究空间点透视几何关系的经典问题,最早由 Fishler 等于 1981 年提出^[1]。如图 6.1.1, 在摄像机内参数和像差系数已知的条件下, 拍摄一幅空间 N 个目标点的图像。这 N 个目标点的空间坐标已知, 各目标点成像的像点坐标通过图像分析提取得到。要求求解摄像机与定义这些目标点的空间坐标系之间的相对位置、姿态关系。根据空间点数目 N 的不同, 又可具体分为 P3P 问题、P4P 问题、P5P 问题等。实际问题中, 这些空间目标点通常是结构参数已知的目标体 (即合作目标) 上的标志灯等特征点, 这些特征点的空间坐标就在该合作目标体坐标系中给出。解决该 PNP 问题就完成了对该目标的相对位置和姿态参数的测量。这在机器人视觉导航、交会对接视觉导航等任务中是一种常见的问题。

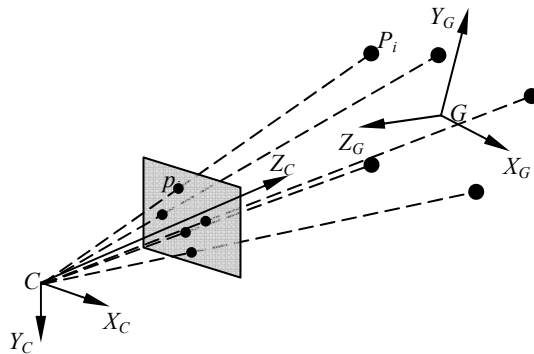


图 6.1.1 PNP 问题的空间成像关系

6.1.2 PNP 问题的基本结论

由于确定一个空间坐标系需要至少 3 个点, 因而 N 小于 2 的 PNP 是没有确定解的,

或者说有无穷多的解。而对于 N 大于等于 6 (其中至少有 6 个点是不共面的) 的 PNP 问题, 就是计算机视觉里经典的直接线性变换问题 (DLT), 可以线性解析地唯一求解。因此, 对于 PNP 问题的研究集中在 P3P、P4P、P5P 问题的解法和解的形式上。这方面的主要研究结论有:

1) 对于 P3P 问题, 当 3 个目标点所决定的平面不通过光心时, 最多有 4 组解^[1];

2) 对于 P4P 问题, 当四个空间点不共面时, 可转化为求解一个双二次的一元四次方程, 最多有 5 组解^[2]。而对于空间四点共面的共面 P4P 问题, 解是唯一的, 不但可以线性求解旋转矩阵和平移向量, 还能够同时求解两项内参数, 如同时求解两个等效焦距。如果这四个空间点是一个长方形的四个顶点, 即使该长方形的长和宽未知, 仍可以求解旋转矩阵^[3~5]。

3) 对于 P5P 问题, 当 5 个控制点中任意 3 点不共线时, 最多有两组解^[6]。

另外, 除了 6 个以上异面特征点或 4 个以上共面特征点的 PNP 问题, P3P 和异面 P4P、P5P 问题在特征点满足一定的分布约束条件时, 也有存在唯一解的情况^[6~9]。如果 PNP 问题有唯一解, 就可以线性求解^[10]。而对于多解的 PNP 问题, 一般采用给定初值后迭代求解的方法^[11]。

6.1.3 P6P 问题的解析求解

虽然有唯一解的 PNP 问题都能够线性求解, 但要确定 P3P 问题或不共面 P4P、P5P 问题是否有唯一解是比较复杂的。而对于不共面 P6P 问题和共面 P4P 问题, 能够线性解析地计算唯一解。

在 3.2.1 节基于 6 个以上异面控制点计算像机线性参数的过程中, 如果像机内参数为已知, 只求解旋转矩阵和平移向量, 就是 $n \geq 6$ 的不共面 PNP 问题。

首先通过移项将式(2.1.12)化为关于 T_X 、 T_Y 、 T_Z 和 $r_0 \sim r_9$ 的齐次线性方程组

$$\begin{cases} Xr_0 + Yr_1 + Zr_2 + T_X - \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} (Xr_6 + Yr_7 + Zr_8 + T_Z) = 0 \\ Xr_3 + Yr_4 + Zr_5 + T_Y - \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} (Xr_6 + Yr_7 + Zr_8 + T_Z) = 0 \end{cases} \quad (6.1.1)$$

由于 $T_Z > 0$, 可令 $s_i = r_i/T_Z$, $i = 0, 1, \dots, 8$, $s_9 = T_X/T_Z$, $s_{10} = T_Y/T_Z$, 式(6.1.1)

可化为关于 $s_0 \sim s_{10}$ 的线性方程组

$$\begin{cases} Xs_0 + Ys_1 + Zs_2 + s_9 - \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x}(Xs_6 + Ys_7 + Zs_8) = \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} \\ Xs_3 + Ys_4 + Zs_5 + s_{10} - \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y}(Xs_6 + Ys_7 + Zs_8) = \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} \end{cases} \quad (6.1.2)$$

其中未知数有 11 个，而从每个控制点可以列出两个方程，当有 6 个以上异面控制点时，就可以求解此线性方程组得到 $s_0 \sim s_{10}$ 。再根据 $r_6^2 + r_7^2 + r_8^2 = 1$ ，有

$$s_6^2 + s_7^2 + s_8^2 = \frac{1}{T_Z^2} \quad (6.1.3)$$

从而

$$T_Z = \sqrt{1/(s_6^2 + s_7^2 + s_8^2)} \quad (6.1.4)$$

进而得到旋转矩阵和平移向量的另两个分量

$$r_i = s_i T_Z \quad (i = 0, 1, \dots, 8), \quad T_X = s_9 T_Z, \quad T_Y = s_{10} T_Z \quad (6.1.5)$$

6.1.4 共面 P4P 的解析求解

(1) 同时求解旋转矩阵、平移向量和等效焦距的共面 P4P 问题^[3]

根据共面点的成像关系式(2.1.23)，可得到关于 $m_i(i=0,1,3,4,5,7,8,9,11)$ 的线性齐次方程组

$$\begin{cases} Xm_0 + Ym_1 + m_3 - \tilde{x}Xm_8 - \tilde{x}Ym_9 - \tilde{x}m_{11} = 0 \\ Xm_4 + Ym_5 + m_7 - \tilde{y}Xm_8 - \tilde{y}Ym_9 - \tilde{y}m_{11} = 0 \end{cases} \quad (6.1.6)$$

由于 $m_{11} = T_Z > 0$ ，令 $s_i = m_i/m_{11}$ ，则式(6.1.6)成为关于 s_i 的线性方程组

$$\begin{cases} Xs_0 + Ys_1 + s_3 - \tilde{x}Xs_8 - \tilde{x}Ys_9 = \tilde{x} \\ Xs_4 + Ys_5 + s_7 - \tilde{y}Xs_8 - \tilde{y}Ys_9 = \tilde{y} \end{cases} \quad (6.1.7)$$

式(6.1.7)中共有 8 个未知数。每个控制点可以提供两个方程，因而当有 4 个以上共面而不共线的控制点时（容易验证，当控制点共线时，方程组的系数矩阵奇异），就可以求解该线性方程组，得到 $s_i(i=0,1,3,4,5,7,8,9)$ 。

这里用到的中间变量 $s_i(i=0,1,3,4,5,7,8,9)$ 与 3.3.1 节基于共面直线标定像机部分线性参数中的中间变量 s_i 是一致的，因而在得到 s_i 后，用与 3.3.1 节中同样的方法计算旋转矩阵、平移向量和等效焦距。

(2) 只求解旋转矩阵和平移向量的共面 P4P 问题

根据共面点 $Z \equiv 0$ 的特性，对移项后的共线方程式(6.1.1)进行简化得到

$$\begin{cases} X_i s_0 + Y_i s_1 + s_9 - \frac{\tilde{x}_i - C_x}{F_x} (X_i s_6 + Y_i s_7) = \frac{\tilde{x}_i - C_x}{F_x} \\ X_i s_3 + Y_i s_4 + s_{10} - \frac{\tilde{y}_i - C_y}{F_y} (X_i s_6 + Y_i s_7) = \frac{\tilde{y}_i - C_y}{F_y} \end{cases} \quad (6.1.8)$$

其中 $s_i = r_i/T_Z$ ($i=0,1,3,4,6,7$) , $s_9 = T_X/T_Z$, $s_{10} = T_Y/T_Z$ 。这是关于 $s_i(i=0,1,3,4,6,7,9,10)$ 的线性方程组,从中可以解出这些参数。根据 R 的单位正交性,有

$$s_0^2 + s_3^2 + s_6^2 = \frac{r_0^2 + r_3^2 + r_6^2}{T_Z^2} = \frac{1}{T_Z^2} \quad (6.1.9)$$

由于 $T_Z > 0$,可以得到

$$T_Z = \sqrt{1/(s_0^2 + s_3^2 + s_6^2)} \quad (6.1.10)$$

进而根据 s_i 的形式计算 T_X 、 T_Y 和旋转矩阵前两列元素,并根据旋转矩阵的单位正交性计算其第三列元素。

在实际测量应用中,如果要求精度较高,可以将上述 PNP 问题的计算结果作为初值,再通过 2.4 节的光束法平差对结果进行优化。

6.2 定制结构目标位置姿态测量

本节所述的定制结构目标,是指圆柱、圆面等特定形体的目标,或在目标上绘制螺旋线等特定形状标记或设置特定分布形式的合作标志。对于这些目标,可以根据其特定的结构特性计算相对位置姿态参数。

6.2.1 圆面和圆柱目标姿态角单像机测量方法^[12-15]

在国防试验基地或靶场试验中,测量各种运动目标在飞行过程中的三维姿态对目标的试验评定、优化设计、故障分析有重要意义。目前国内各试验靶场中,通常采用光测经纬仪、高速摄像机等光测设备对目标跟踪拍摄、获取图像,通过图像目标特征检测、数据后处理等环节获得目标的位置姿态参数。

传统数据处理方法将目标作为质点目标,采用前述线-线交会确定点的方法,可以处理得到目标的弹道、轨迹、速度、加速度等信息,但无法得到目标的三维姿态信息。为了获得三维姿态,只能将交会后的目标首尾两点连接起来作为目标中轴线,从而得到姿态信息。这种方法计算复杂,测量精度很低;当不同站图像获得目标不同部位,例如一台获得目标头部而另一台是尾部时,由于没有足够图像同名点而方法失效。

针对国防试验基地的由于距离远通常只能得到目标轮廓的实际情况,作者提出了利

用两站或多站图像，首先提取目标轮廓线，然后确定图像目标中轴线，再结合光心确定一平面，通过 2.5.1 节介绍的面-面交会，得到目标三维姿态(俯仰角和偏航角)的方法^[12]。设通过面-面交会确定目标中轴线的为

$$\begin{cases} A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0 \\ A_2X + B_2Y + C_2Z + D_2 = 0 \end{cases} \quad (6.2.1)$$

则其三个方向数为

$$l = \begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix}, \quad m = \begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix}, \quad n = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix} \quad (6.2.2)$$

从而，目标的俯仰角和偏航角为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}}\right), \quad \psi = -\arctan(n/l) \quad (6.2.3)$$

这种方法原理简单、测量精度高、对图像质量要求低，但要求至少有两站以上的目标图像。而在实际中有时只能获得一个站目标图像。因此，研究用单站图像确定目标三维姿态具有重要的实际应用价值。

针对靶场光测图像目标多为圆柱体形状，如火箭、炮弹、返回舱等，并且目标距离较远的应用背景，可近似采用平行投影成像模型，并充分利用目标几何形状已知的约束条件^[16]。

(1) 目标圆环椭圆度法

任意空间圆环在摄像机坐标系像平面 $X_C Y_C$ 平行投影的情况可分为三类：空间圆环法线与投影平面垂直时，投影图形为圆；平行时，投影图形为直线；其它情况时，投影图形为椭圆，该椭圆的长轴 a 等于空间圆环法线与投影平面垂直时投影圆的直径。如图 6.2.1(a)所示， n' 为空间圆法线 n 在 $X_C Y_C$ 平面的投影， n 和 n' 的夹角 φ 称为空间圆平面与像平面的夹角，或离面夹角。 n' 与 X_C 轴的夹角 ω 为面内方位角。 ω 和 φ 就是空间圆法线在摄像机坐标系中的姿态角。得到在像机坐标系下的结果后，可以换算到在世界坐标系、摄像平台坐标系等坐标系下的姿态角。

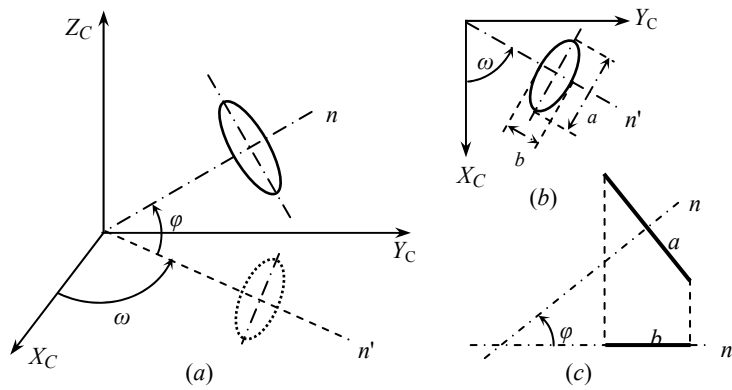


图 6.2.1 圆环投影图像

图 6.2.1(b)是 $X_C Y_C$ 平面正视图。根据平行投影关系可知：法线 n 的投影 n' 和椭圆的长轴垂直，而和短轴重合。因此只要得到投影椭圆的长（短）轴方向，就可确定空间圆法线在成像面内的方位角 ω 。图 6.2.1(c)是 $n Z_C$ 平面正视图，离面高低角 φ 与投影椭圆的长轴 a 和短轴 b 满足公式

$$\varphi = \arcsin(b/a) \quad (6.2.4)$$

对实际空间圆的图像，通过提取图像中椭圆的边界点，然后用椭圆曲线最小二乘拟合的方法得到椭圆长短轴 a 、 b 的尺度和方向信息，就可以测量出空间圆法线在摄像机坐标系的面内方向角 ω 和离面角 φ 。其中 φ 的符号二义性可以由其它条件确定，例如根据观测到的是轴对称目标空间圆的上半椭圆，还是下半椭圆，可确定角度 φ 的符号取值。

这种方法适用于小视场、远距离拍摄的情况，此时目标成像可以近似看作平行投影。如果目标为圆柱或圆锥形状，可以在目标表面做与目标轴线垂直的圆环特征线，或直接将圆柱或圆锥的端部圆边界线作为空间圆。当目标的观测面为平面时，则可以在该平面上制作圆形标志，通过测量此圆形标志的法线方向来获得目标的三维姿态角。

(2) 目标长宽比法

在摄像机坐标系中，将任意一个空间圆柱体向 $X_C Y_C$ 平面上作平行投影，则当圆柱体轴线 n 与 $X_C Y_C$ 平面垂直时，投影图形为圆；平行时，投影图形为矩形；其余情况投影图形为一个两端为圆弧线的矩形体。如图 6.2.2(a)所示， n' 为圆柱体轴线 n 在 $X_C Y_C$ 平面的投影，则 n 和 n' 的夹角 φ 为空间圆柱体与像平面的离面夹角， n' 与 x_c 轴的夹角 ω 为面内方位角。 ω 和 φ 就是空间圆柱体轴线在摄像机坐标系中的姿态角。

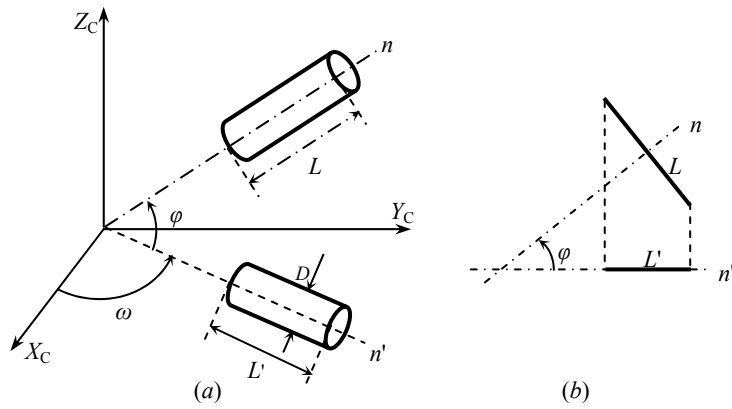


图 6.2.2 圆柱体投影图像

图 6.2.2(b)是 $n'Z_c$ 平面正视图，圆柱体长 L 投影后变为 L' ，则可知 φ 角等于 L'/L 的反余弦函数。设 D 为目标的实际直径， D_1 和 L_1 分别为图像平面上目标的直径和长度。则 φ 角等于

$$\varphi = \arccos \frac{L'}{L} = \arccos \frac{L_1 D / D_1}{L} = \arccos \frac{L_1 / D_1}{L / D} \quad (6.2.5)$$

因此只要知道实际目标的长宽比 (L/D) 和图像上目标的长宽比 (L_1/D_1)，就可以得到 φ 角度的值。此方法也有 φ 符号取值的二义性问题，同样可以用其它条件确定，例如用图像观察到的是目标的头部还是尾部来确定。这里测量的是目标轴线的图像面内夹角和离面夹角，而实际目标在全局坐标系下的姿态角，如俯仰角和偏航角，还要考虑摄像系统坐标系与全局坐标系的关系进行转换。

(3) 测量轴对称目标滚转角的四区域轮廓螺旋线法

圆柱体目标是轴对称的，其外轮廓无法反映其滚转角（绕对称轴的旋转角）的状态，为了得到滚转角信息，必须在目标上设置能反映滚转状态的标志或特征。本方法要求在圆柱体目标的表面作如图 6.2.3(a)所示的四区域轮廓螺旋线标志，图 6.2.3(b)为此轮廓螺旋线的展开图像，图 6.2.3(c)为投影图像(a)上中轴的灰度分布示意图。滚转角 κ 定义为中轴线与投影方向线所成的平面和中轴线与螺旋线起始母线所成的平面之间的夹角。用如图 6.2.3(a)所示的黑白相间的四个区域组成的标志，与直接用一条螺旋线来表示有明显优势。当目标较远，螺旋线图像不清晰时，这四个黑白相间区域的轮廓边界通常仍能清晰分辨，从而可得到目标的滚转角。

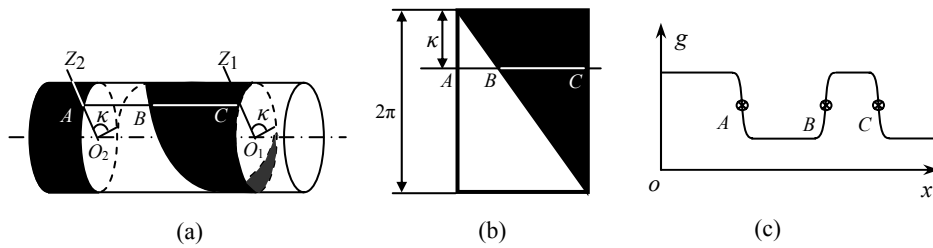


图 6.2.3 四区域轮廓螺旋线法测滚转角示意图

测量滚转角 κ 的方法为：首先提取圆柱体目标的两条边界线和四个黑白相间区域边界的轮廓线，然后利用两条边界线来确定图像目标的中轴线，最后确定目标中轴线与四区域轮廓螺旋线边缘的三个交点 A 、 B 、 C 的位置。由此可以得到圆柱体目标螺旋线标志起始位置相对于过摄像系统光心和目标中轴线的平面的滚转角 κ 为

$$\kappa = 2\pi \frac{AB}{AC} \quad (6.2.6)$$

目标相对于其它平面的滚转角可以通过目标中轴线的姿态角和摄像系统光轴的姿态角进行转换得到。

(4) 测量圆柱目标姿态角的单像机面-面交会法

2.5.1 节的面-面交会需要两台像机，而对于圆柱体目标，在一幅图像里就能提取到它的两条母线，并进行单像机面-面交会，计算目标的姿态角度。本方法是在中心透视投影模型下得到的，不要求做平行投影近似^[17]。

如图 6.2.4 所示，圆柱目标所成像的两条边缘为直线 l_1 和 l_2 ，它们各自与光心 C 确定平面 Π_1 和 Π_2 。根据透视成像关系， Π_1 和 Π_2 将分别与目标圆柱相切，两条切线 L_1 和 L_2 是圆柱的两条母线，而 l_1 和 l_2 分别是 L_1 和 L_2 所成的像。由于圆柱目标的母线 L_1 、 L_2 ，圆柱的中轴线 L 互相平行，根据立体几何知识，平面 Π_1 和 Π_2 的交线 L' 与圆柱目标的中轴线 L 平行，两者的姿态角度一致。因而，根据图像直线 l_1 、 l_2 和光心 C 计算平面 Π_1 和 Π_2 ，再面-面交会计算 Π_1 和 Π_2 的交线 L' 的参数，则 L' 的俯仰角和偏航角就是该圆柱目标的姿态角。实际上，只需要得到 Π_1 和 Π_2 的法向量 \vec{n}_1 和 \vec{n}_2 ，则圆柱目标中轴线的法向为

$$\vec{n} = \vec{n}_1 \times \vec{n}_2 \quad (6.2.7)$$

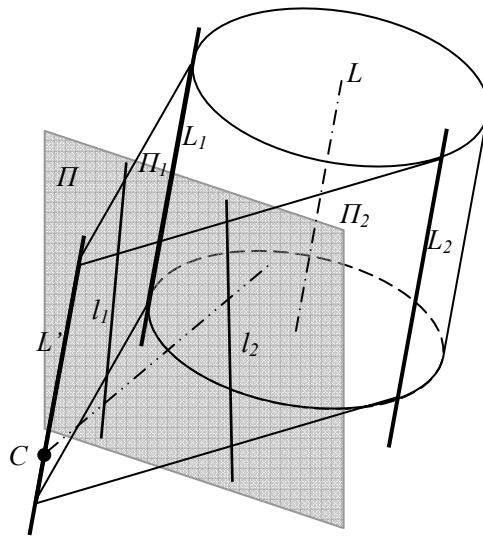


图 6.2.4 单像机面-面交会法测圆柱目标姿态角原理

以上方法仅通过单站的单幅光测图像就可以确定目标的空间三维姿态参数：俯仰角、偏航角和滚转角。它们适合于无法进行多像机拍摄的情况，具有较好的灵活性和实用性。

6.2.2 基于定制分布的合作标志测量目标位置姿态

如果在目标上设置若干个相互位置关系已知的合作标志点，标志点的数目和分布满足 PNP 问题可解条件，则可以作为 PNP 问题进行求解，计算目标的位置姿态参数。而在有些应用里，可以定制合作标志点的分布方式，然后根据较简单的空间几何关系计算目标的位置姿态参数。这样计算得到了很大的简化，既可以作为迭代计算的初值，也可以在精度要求不高的任务中直接应用。

如图 6.2.5(a)，是某一空间交会对接任务中的目标器合作标志设置方式^[18]。采用 5 个合作标志，其中 4 个分布在直径为 D 的圆周两条相互垂直直径的端点处，第 5 个合作标志从另 4 个合作标志分布位置的圆心突出这 4 个合作标志所在平面距离 r 。用追踪器上安装的一台像机拍摄目标器的图像，根据 5 个合作标志的成像位置分析目标器的相对位置和姿态。

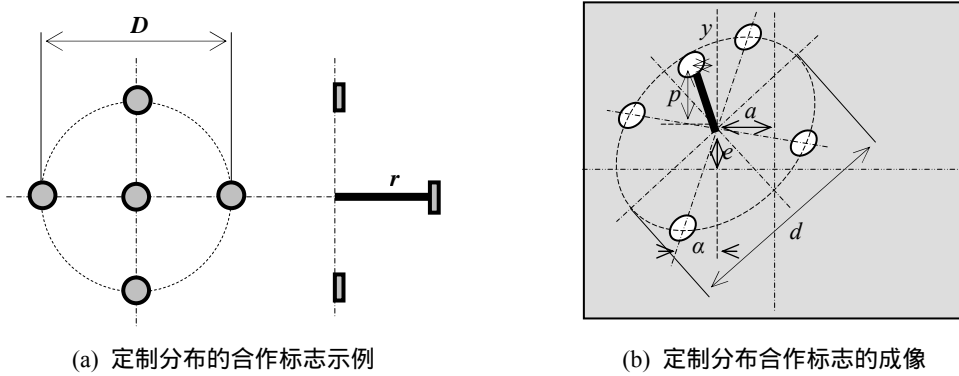


图 6.2.5 根据定制分布合作标志的成像分析相对位置姿态参数

如图 6.2.5(b)，估计目标相对位置姿态参数的步骤是：

- 1) 根据 4 个共面标志的提取结果计算它们所确定的图像椭圆，它代表了这 4 个标志所在圆周成的像。计算该成像椭圆的中心和长、短主轴。
- 2) 该成像椭圆长轴的长度 d (像素) 对应实际 4 个共面标志所在圆周的直径 D ，据此计算目标中心到像机光心的距离 S ：

$$S = F \cdot D / d \quad (6.2.8)$$

其中 F 为相机的等效焦距 (这里没有区分图像水平方向和竖直方向的等效焦距)。这实际就是根据图像缩放倍数计算物距。

- 3) 根据成像椭圆中心在图像水平方向和竖直方向偏离图像主点的距离 a 和 e 计算目标相对像机的方位角 A_A 和高低角 A_E ：

$$A_A = \arctan(a/F), \quad A_E = \arctan(e/F) \quad (6.2.9)$$

实际上，用直线段连接目标中心和像机光心，物距 S 为该线段的长度， A_A 和 A_E 为该线段方向相对于像机光轴方向的方位角和高低角。这 3 个参数的作用与前述的平移向量一样，确定了目标相对于像机的空间位置。

- 4) 计算 4 个共面标志中相对标志的连线在图像上的方向角度 α 作为目标的滚转角。
- 5) 根据离面标志在图像水平方向和竖直方向偏离图像椭圆中心的距离 y 和 p ，以及该标志实际离开另 4 个标志所共平面的距离 r ，计算目标的偏航角 ω 和俯仰角 φ ：

$$\omega = \arctan\left(\frac{y \cdot D}{d} / r\right), \quad \varphi = \arctan\left(\frac{p \cdot D}{d} / r\right) \quad (6.2.10)$$

实际上，成像时各个位置姿态参数的作用是相互耦合的，比如偏航角和水平方向的相对位置变化都会引起离面标志在成像时偏离成像椭圆中心的距离 d 的变化。而上述的计算过程中并没有考虑这种耦合，因而会带来一定的误差。

6.3 基于轮廓匹配测量目标位置姿态

设置合作标志用于合作目标相对位置姿态参数的测量是一种常用的方式。但当目标相对距离较远或成像不很清晰时，往往不容易识别和提取合作标志点。而且对于许多实际任务，也无法事先设置合作标志。

目标轮廓成像的形状也是与目标的相对位置和姿态有关的，简单的比如 6.2.1 节的长宽比法和椭圆度法，就是根据目标成像外形的变化计算相对姿态参数。对于更复杂外形的合作目标，由于目标的三维结构是完全清楚的，仍然可以根据目标成像的外形轮廓计算相对位置和姿态^[19]。

(1) 基于轮廓匹配测量目标位置姿态的基本原理

基于轮廓匹配测量目标位置姿态的基本思路是给定初值后通过迭代优化，让根据目标位置姿态参数对目标边缘重投影的结果与目标边缘实际成像结果匹配偏差最小。实现步骤如图 6.3.1。

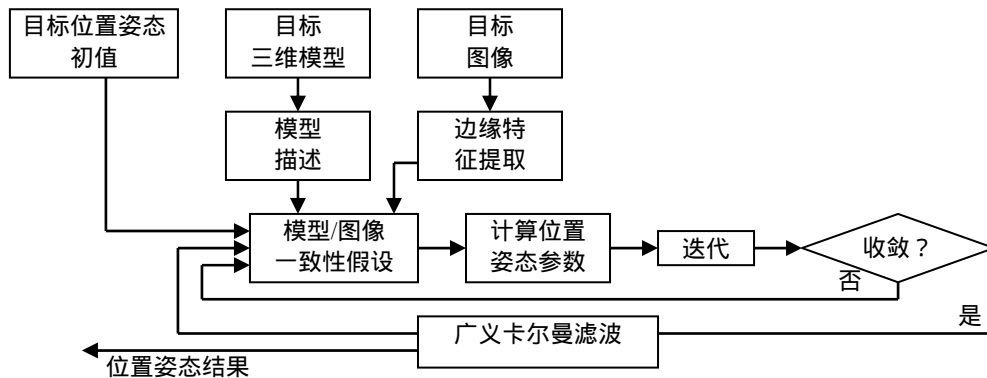


图 6.3.1 基于轮廓匹配测量目标位置姿态的总体步骤

其中，“模型/图像一致性假设”意即根据目标位置姿态参数和目标三维模型对目标进行重投影的结果，应与目标实际图像相一致。根据这一假设，在给出的目标位置姿态参数初值的基础上，以重投影边缘与实际成像边缘偏差最小为目标函数，计算目标位置姿态参数的修正量，对初值进行修正。对该修正过程进行迭代，直至收敛。广义卡尔曼滤波是运动学测量中常用的一种数据处理手段，通过将当前时刻与以前时刻的数据关联，对测量结果进行平滑和适当修正，给出最终结果。

根据 2.1 节介绍的像机成像模型，不考虑非线性畸变，空间点 P 与其成像点 p 之间的关系由投影矩阵 M 确定，投影矩阵 M 由内参数矩阵 K 和外参数矩阵 E 组成，记为

$$p = M \cdot P = K \cdot E \cdot P \tag{6.3.1}$$

其中的外参数矩阵 E 由描述目标位置姿态的旋转矩阵（旋转角）和平移向量组成。

首先在所拍摄的目标图像上提取目标的边缘轮廓，然后：

1) 根据给定的位置姿态参数初值或上一步迭代计算的位置姿态参数结果，计算外参数矩阵 E 和投影矩阵 M 。

2) 根据已知的目标结构特点，分析目标的哪些边缘轮廓特征会比较清晰的成像，选取这样的轮廓特征作为“可见轮廓”。

3) 用投影矩阵对所选取的“可见轮廓”按式(6.3.1)进行投影成像。

4) 在上一步投影成像的“可见轮廓”中选取若干投影点，沿目标在各投影点处投影轮廓的法向进行一维搜索，找到最近的实际成像目标边缘点，并计算该点与对应投影点的距离 d_i 。如图 6.3.2，实线轮廓表示实际目标成像提取结果，虚线轮廓表示根据上一步位置姿态参数结果重投影的“可见轮廓”。虚线轮廓上的白点表示所选取的投影点，双向箭头表示一维搜索方向，实线轮廓上的黑点表示搜索到的实际成像目标边缘点。

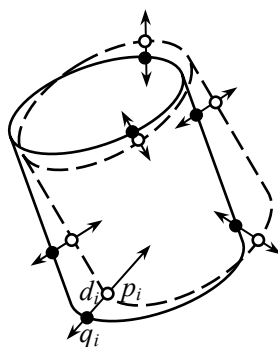


图 6.3.2 沿投影轮廓法向搜索实际成像目标边缘点

5) 目标实际位置姿态与上一步位置姿态计算结果之间差别用外参数矩阵的变化 ΔE 描述，即实际像点

$$q = K \cdot E \cdot \Delta E \cdot P \quad (6.3.2)$$

6) 综合式(6.3.1)和式(6.3.2)，以 $\sum d_i^2$ 为最小化目标函数，最小二乘求解 ΔE 或直接求解目标位置姿态参数的修正量 $(\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z)$ 和 $(\Delta A_x, \Delta A_y, \Delta A_z)$ 。

7) 用上一步的求解结果修正目标位置姿态参数，再从第 1)步开始迭代，直到修正量求解结果小于设定阈值。

(2) 方法效果验证

文献[19]中对上述方法进行了实验验证。首先控制目标模型作三维平移和三维旋转运动，并给出目标位置姿态参数真值，同时用像机采集目标图像。再采用上述方法计算目

标的位置姿态参数，并将计算结果与真值进行比对。实验结果表明，在目标相对距离初值误差优于相对距离的 10%，目标姿态角度误差优于 20° 的条件下，计算结果能够收敛。该方法测量目标相对位置的精度优于相对距离的 2%，测量目标姿态角度的精度优于 3°。

6.4 目标位置姿态参数的双目交会测量

根据 2.3 节的线-线交会测点原理，如果有两台以上像机对目标上的各个特征点分别进行交会测量，得到 3 个以上特征点的空间位置，就可以确定目标的位置和姿态参数。为了得到高精度的测量结果，可以在线性求解目标位置姿态初值的基础上，通过光束法平差等优化算法计算精确结果。特别是在空间、水下、振动等恶劣环境中进行测量时，测量系统参数容易受到扰动而不同于标定结果，如果不对扰动影响进行修正，会给测量结果带来很大的误差甚至使测量结果不可用。而在得到初值的基础上采用光束法平差进行优化，可以将易受扰动的测量系统参数也作为平差参数进行修正，仍得到高精度测量结果，达到抗测量系统参数扰动的效果^[20]。

6.4.1 合作目标位置姿态初值的双目线性求解

设双目测量中像机组由两台像机 C 和 C' 组成，以 C 的像机坐标系 $C-X_C Y_C Z_C$ 作为像机组的坐标系，则像机 C 的平移向量 $T = (0, 0, 0)$ ，姿态角 $A = (0, 0, 0)$ ，旋转矩阵 R 为单位阵；像机 C' 的外参就是它相对于 C 的位置姿态参数，为平移向量 (T'_x, T'_y, T'_z) ，姿态角 (A'_x, A'_y, A'_z) 和旋转矩阵 R' 。目标体上的特征点 P 在目标体坐标系 $G-X_G Y_G Z_G$ 中的坐标为 $P_G(X_G, Y_G, Z_G)$ ，在像机组坐标系中的坐标为 $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$ 。 P_G 与 P_C 间的坐标转换关系由目标相对于像机组的平移向量 T_{GC} 和旋转矩阵 R_{GC} 来描述

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{0,GC} & r_{1,GC} & r_{2,GC} \\ r_{3,GC} & r_{4,GC} & r_{5,GC} \\ r_{6,GC} & r_{7,GC} & r_{8,GC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{x,GC} \\ T_{y,GC} \\ T_{z,GC} \end{bmatrix} \quad (6.4.1)$$

T_{GC} 和 R_{GC} 就是要求解的目标位置姿态参数。

设像机 C 主点为 (C_x, C_y) ，等效焦距为 (F_x, F_y) ，像机 C' 主点为 (C'_x, C'_y) ，等效焦距为 (F'_x, F'_y) ，特征点 P 在像机 C 和 C' 图像上的像点分别为 $p(x, y)$ 和 $p'(x', y')$ ，求解初值时可以不考虑像差，则成像共线方程为

$$\begin{cases} \frac{x - C_x}{F_x} = \frac{X_C}{Z_C} \\ \frac{y - C_y}{F_y} = \frac{Y_C}{Z_C} \\ \frac{x' - C'_x}{F'_x} = \frac{r'_0 X_C + r'_1 Y_C + r'_2 Z_C + T'_x}{r'_6 X_C + r'_7 Y_C + r'_8 Z_C + T'_z} \\ \frac{y' - C'_y}{F'_y} = \frac{r'_3 X_C + r'_4 Y_C + r'_5 Z_C + T'_y}{r'_6 X_C + r'_7 Y_C + r'_8 Z_C + T'_z} \end{cases} \quad (6.4.2)$$

将式(6.4.1)中的 X_C 、 Y_C 和 Z_C 代入式(6.4.2)，经整理后就得到关于 T_{GC} 和 R_{GC} 各元素的 4 个线性方程，共有 12 个未知数。当提取合作目标的 3 个以上特征点时，就可以联立求解该线性方程组，并进一步从旋转矩阵分解姿态角，得到目标体相对于像机组的位置姿态参数初值。

6.4.2 非合作目标位置姿态和结构初值的双目线性求解

由于非合作目标各特征点在目标体坐标系中的坐标未知，为了求解目标位置姿态和各特征点在目标体系中的坐标的初值，需要首先通过双目交会测量各特征点在像机组坐标系中的坐标，再进而根据目标体坐标系的定义，通过坐标变换得到目标位置姿态参数和特征点在目标体系中坐标的初值。

设通过交会计算得到特征点 P 在像机组坐标系中的坐标为 $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$ 。非合作目标体坐标系可以按以下方式从 3 个不共线特征点 P_0 、 P_1 、 P_2 来定义：以 P_0 为目标体坐标系原点 G ； P_0 、 P_1 确定直线为 G - X_G 轴， P_1 处于 G - X_G 的正半轴； P_0 、 P_1 、 P_2 确定的平面为 G - $X_G Y_G$ 平面， P_2 处于 G - Y_G 轴正向一侧；依据右手定则确定 G - Z_G 轴。设根据这样的定义， P_0 、 P_1 、 P_2 在目标体系中的坐标为 $P_{G0}(0,0,0)$ ， $P_{G1}(X_{G1},0,0)$ 和 $P_{G1}(X_{G2},Y_{G2},0)$ 。由于 P_0 、 P_1 、 P_2 在像机组坐标系中的坐标已交会测得，这 3 个特征点间的相对位置关系是清楚的，因而可以根据目标体坐标系的定义计算 X_{G1} 、 X_{G2} 和 Y_{G2} 。特征点 P 在像机组坐标系中的坐标 $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$ ，和它在目标体坐标系中的坐标 $P_G(X_G, Y_G, Z_G)$ 间的坐标变换关系，由目标体相对于像机的平移向量 T_{GC} 和旋转矩阵 R_{GC} 表示为式(6.4.1)。而对于 P_0 、 P_1 、 P_2 ， $Z_{G0}=Z_{G1}=Z_{G2}=0$ ，因而对于这 3 点，式(6.4.1)简化为

$$\begin{bmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{0,GC} & r_{1,GC} \\ r_{3,GC} & r_{4,GC} \\ r_{6,GC} & r_{7,GC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Gi} \\ Y_{Gi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{X,GC} \\ T_{Y,GC} \\ T_{Z,GC} \end{bmatrix}, \quad i = 0, 1, 2 \quad (6.4.3)$$

式(6.4.3)可化为关于 R_{GC} 前两列元素和 T_{GC} 的 3 个元素的线性方程组。求解该线性方程组，再根据单位正交性计算旋转矩阵的第三列元素，并进而分解出 3 个旋转角。

得到目标体坐标系和像机组坐标系之间的位置姿态关系后，就可以通过坐标转换，将交会得到的各特征点在像机组坐标系下的坐标 $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$ 变换到在目标体坐标系中的坐标 $P_G(X_G, Y_G, Z_G)$ 。至此，就得到了非合作目标位置姿态参数和结构参数（特征点的目标体系坐标）初值的计算结果。

6.4.3 目标位置姿态精确值的抗扰动光束法平差求解

得到目标位置姿态初值后，可以基于 2.4 节介绍的光束法平差，求解目标位置姿态参数的精确结果。对于合作目标，需要将平移向量和旋转角作为平差参数，而对于非合作目标，还需要将各特征点在目标体坐标系中的坐标也作为平差参数。而为了通过光束平差实现抗扰动测量的目的，需要在平差计算中将易受扰动或受扰动后会对测量结果产生较大影响的测量系统参数也作为平差参数进行修正。

(1) 在合作目标位置姿态求解中考虑系统参数扰动

考虑像机的内参数、像差系数以及两像机之间的相对位置姿态参数可能受到扰动的情况。根据任务条件选择这其中的部分参数与目标位置姿态参数共同作为平差参数。将单时刻或多个时刻的图像共同进行平差处理，就得到了目标位置姿态的精确结果，并同时得到了对可能受到扰动的测量系统参数的修正结果。根据双目交会测量的原理，两台像机之间的相对姿态角和相对距离（即双像机之间的基线长度）受到扰动时对测量结果的影响被放大的最显著，在选择平差修正参数时应重点考虑。

设从 m 个方位拍摄图像，目标特征点数为 n ，由于根据每个像点可以列出两个共线方程，因而双目测量的观测方程数为 $4mn$ 。而待求解的目标位置姿态参数的数目为 $6m$ （在每个采图方位各有 3 个位置分量和 3 个旋转角）。设待平差修正的系统参数数目为 u ，则平差参数数目为 $6m+u$ 。如果另外还有 v 个约束条件可以利用，则要求采图方位数和特征点数目满足

$$4mn + v \geq 6m + u \quad (6.4.4)$$

对于合作目标体的结构扰动，即各特征点在目标体坐标系中的坐标受到扰动的情况，可以将可能受到扰动的特征点的目标体系坐标也作为待平差参数进行修正，达到抗扰动的目的。这相当于下述的非合作目标位置姿态和结构参数精确值的平差求解。

(2) 在非合作目标位置姿态和结构参数求解中考虑系统参数扰动

非合作目标位置姿态和结构参数的平差优化求解中，除了需要将特征点的目标体系坐标连同目标位置姿态参数作为平差参数外，对测量系统参数扰动进行平差修正的情况与合作目标的情况相同。而如果特征点之间存在约束关系，则可以列出相应的约束条件方程在平差中使用。

设从 m 个方位拍摄图像，目标特征点数为 n ，则双目测量的观测方程数为 $4mn$ 。而待求解的目标位置姿态参数的数目为 $6m$ 。每个特征点的目标体系坐标有 3 个分量，而上节中用于定义目标体坐标系的前 3 个特征点的 9 个坐标分量中，仅包含 X_{G1} 、 X_{G2} 和 Y_{G23} 个未知的坐标分量，所以待求解的目标结构参数数目为 $3n-6$ 。设待平差修正的系统参数数目为 u ，则平差参数数目为 $6m+3n-6+u$ 。如果另外还有 v 个约束条件，则要求采图方位数和特征点数目满足

$$4mn + v \quad 6m + 3n - 6 + u \quad (6.4.5)$$

根据成像关系列出观测方程，根据约束条件列出约束方程后，就可以同时对待求解参数和易受扰动参数进行光束法平差优化求解，从而在计算目标位置姿态参数的同时，实现对测量系统参数所受扰动的修正，抑制扰动影响，得到高精度的测量结果。

参考文献

- [1] Fishler M A , Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [2] R. Horaud, B. Conio, O. Le Boulleux. An Analytic Solution for the Perspective 4-Point Problem[C]. CVGIP, 1989(47): 33-44.
- [3] 胡占义, 雷成, 吴福朝. 关于 P4P 问题的一点讨论[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 770-776.
- [4] M. A. Penna. Determining Camera Parameters from the Perspective Projection of a Quadrilateral[J]. Pattern Recognition, 1991, 24(6): 533-541.
- [5] M. A. Abidi and T. Chandra. A New Efficient and Direct Solution for Pose Estimation Using Quadrangular Targets: Algorithm and Evaluation[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(5): 534-538.
- [6] 吴福朝, 胡占义. PnP 问题的线性求解算法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 682-688.
- [7] 周鑫, 朱枫. 关于 P3P 问题解的唯一性条件的几点讨论[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1696-1701.
- [8] 孔辉, 谢端强. 不共面 P4P 问题多解的判定方法[J]. 计算机工程与科学, 2004, 26(5): 43-45.
- [9] 吴福朝, 胡占义. 关于 P5P 问题的研究[J]. 软件学报, 2001, 12(5): 768-775.
- [10] C. I. Lee, T. S. Huang. Finding Point Correspondences and Determining Motion of Two Weak Perspective Views[J]. Computation Vision, Graphic and Image Processing, 1990, 52(3): 309-327.
- [11] M. L. Liu, Wong K H. Pose Estimation Using Four Corresponding Points[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20: 69-74.

- [12] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测法测量空间目标三维姿态[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2) : 15-19.
- [13] 于起峰, 孙祥一, 权铁汉等. 用标定和亚像素技术实现三维运动目标的高精度测量[J]. 宇航学报, 1999, 20(3) : 38-42.
- [14] 于起峰, 孙祥一, 邱志强. 从单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. 光学技术, 2002, 28(1) : 77-79.
- [15] 陈国军, 孙祥一, 于起峰. 空间目标三维姿态的单目摄影测量[J]. 现代力学测试技术, 1998: 348-351.
- [16] 于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [17] 丁晓华. 三维运动实时光测系统[D].国防科学技术大学硕士学位论文, 2002.
- [18] Wigbert Fehse. Automated Rendezvous And Docking Of Spacecraft[M]. Cambridge Univ. Press, 2003.
- [19] Jed M. Kelsey, Jeffrey Byme, Martin Cosgrove, etc. Vision-Based Relative Pose Estimation for Autonomous Rendezvous and Docking[C]. 2002 IEEEAC paper #1333.
- [20] 尚洋, 于起峰. 基于视觉抗扰动测量空间目标位置姿态[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 938-942.

第七章 目标表面三维结构和形状测量

上一章介绍的描述目标相对于像机关系的体目标位置姿态参数测量，是摄像测量的重要任务之一。而从图像中分析测量未知结构目标表面各点的位置及之间的相互关系（可以是直线等基元）或整个表面的三维形状，从而了解目标的几何结构特性，也是摄像测量的一项广泛应用的重要任务。这种三维表面形状测量也常称为三维结构重建。

如果能够从至少两台像机来拍摄目标图像，并且像机的内参数和像机之间的相对位置姿态已精确标定，在提取和正确匹配目标的图像特征后，就可以采用三维交会测量方法得到目标表面各点的空间三维位置，从而得到目标表面三维结构和形状的测量结果。另外，如果给定像机参数、目标结构参数等的初值，再结合一些约束条件，则可以采用光束法平差等方法优化计算目标结构和形状参数的精确结果。关于这些内容已在本书前述章节中介绍过。本章主要介绍基于多幅图像之间的多视图几何约束关系进行目标表面三维结构测量的基本原理和方法，以及测量目标表面三维形状的结构光方法。

7.1 基于多视图几何约束的图像特征点匹配

基于序列图像对目标结构进行三维重建，需要在各帧图像上提取目标表面大量的特征点，并且匹配图像间的同名特征点。可靠、高效、高精度地进行序列图像间特征点的匹配，是完成目标结构三维重建的前提条件。

对于不同图像之间的特征点匹配，根据是否利用图像间的几何约束条件可以分为两类。第一类是依据目标的亮度、色彩、几何形状等成像特征进行图像特征点匹配，第五章中介绍的相关匹配、最小二乘匹配、SIFT 等属于这类匹配方法。第二类是在目标成像特征的基础上，利用待匹配图像之间的相对几何关系（多视图几何约束），通过视差有限性条件、极线约束条件、单应约束条件等进行特征点匹配。视差有限性条件是指对于同一场景的序列图像，相邻近的图像由于成像方位差别小、重叠度高，同名点在图像中的位置差别较小，可以在较小范围内搜索匹配点。这里对此不作详细介绍。单应反映了平面场景不同成像的像点之间的对应关系，主要用于平面场景和近似平面场景成像的特征点匹配^[1]。根据单应条件，平面场景的特征点在一幅图像中的像点可以一一对应到另一幅图像中的像点，这样，特征点匹配只在对应像点位置附近进行搜索匹配，可以大大提高匹配效率。8.3 节将对平面诱导单应作简单介绍。本节着重介绍基于极线约束条件进行特征点匹配的基本原理和方法，以及能够有效地剔除匹配野值的 RANSAC 算法。

在基于序列图像重建目标三维结构过程中，上述两类特征点匹配方法通常应用在序

列图像分析的不同阶段。在序列图像三维重建分析的第一阶段，序列图像之间的相对几何是未知的，必须采用基于目标自身成像特征约束的匹配方法，提取和匹配比较显著的特征点，用于解算不同成像之间的相对几何关系。而在序列图像相对几何关系解算之后，再综合利用基于目标成像特征的方法和基于多视图几何约束条件的方法进行匹配。

7.1.1 基于极线约束条件的图像特征点匹配

(1) 极线约束关系和基础矩阵

在两视图关系中，两个摄像机光心的连线称为基线，所有通过两个摄像机光心的平面都称为极平面，给定基线以外的一个空间点，该点就与基线确定了一个具体的极平面。极平面与摄像机像平面的交线称为极线，基线与像平面的交点称为极点。如图 7.1.1，齐次坐标为 X 的空间点在光心分别为 C 和 C' 的像机的像平面 S 和 S' 上投影的像点齐次坐标为 x 和 x' ， C 、 C' 和 X 三点所确定的空间平面 π 就是一张经过 X 的极平面，平面 π 分别与像平面 S 和 S' 的交线 l 和 l' 为极线，基线与 S 和 S' 的交点 e 和 e' 为极点。上述的点、线、面的符号都表示其矢量形式。可见，空间点 X 在两个像平面上对应的像点 x 和 x' 必然位于对应的极线 l 和 l' 上，这种关系就是两幅图像之间的极几何关系，也就是极线约束^[1~3]。

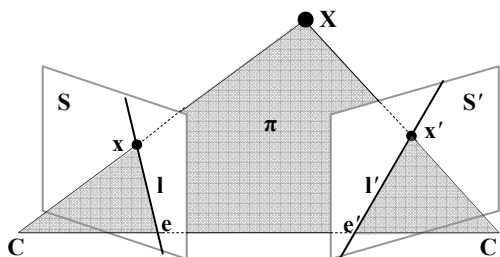


图 7.1.1 极线约束关系

两幅图像间的极线约束关系可以由基础矩阵来描述，下面介绍基础矩阵的推导。

设 K 和 K' 为两次成像的像机内参数矩阵：

$$K = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x \\ 0 & F_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad K' = \begin{bmatrix} F'_x & 0 & C'_x \\ 0 & F'_y & C'_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.1.1)$$

其中 (C_x, C_y) 、 (C'_x, C'_y) 和 (F_x, F_y) 、 (F'_x, F'_y) 为两次成像的主点和等效焦距。设两次成像的投影矩阵为 M 和 M' ，则根据成像关系

$$\lambda \mathbf{x} = M\mathbf{X}, \quad \lambda' \mathbf{x}' = M'\mathbf{X} \quad (7.1.2)$$

其中 λ 、 λ' 为空间点分别到光心 C 和 C' 的距离。设 M 的伪逆为 M^+ ，即 MM^+ 为单位

阵，则空间点 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = \lambda M^+ \mathbf{x} \quad (7.1.3)$$

其中 λ 为 \mathbf{X} 到光心 \mathbf{C} 的距离。将其代入式(7.1.2)的第二式，得到 \mathbf{x} 的同名像点 \mathbf{x}' 为

$$\mathbf{x}' = \frac{\lambda}{\lambda'} M M^+ \mathbf{x} \quad (7.1.4)$$

其中 λ' 为 \mathbf{X} 到光心 \mathbf{C} 的距离。第一次成像的光心 \mathbf{C} 在第二幅图像中的对应像点就是极点 \mathbf{e}' ：

$$\mathbf{e}' = \frac{1}{\lambda_e} M \mathbf{C} \quad (7.1.5)$$

其中 λ_e 为两次成像光心之间的距离。而极线 \mathbf{l}' 为通过 \mathbf{e}' 和 \mathbf{x} 的直线，因而

$$\mathbf{l}' = [\mathbf{e}']_{\mathbf{x}} \mathbf{x}' = \frac{\lambda}{\lambda'} [\mathbf{e}']_{\mathbf{x}} M M^+ \mathbf{x} \quad (7.1.6)$$

其中 $[\mathbf{e}']_{\mathbf{x}}$ 为由极点 $\mathbf{e}' = [e_0 \ e_1 \ e_2]^T$ 定义的秩 2 的反对称矩阵（称为叉积）：

$$[\mathbf{e}]_{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -e_2 & e_1 \\ e_2 & 0 & -e_0 \\ -e_1 & e_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.1.7)$$

由于像点 \mathbf{x} 在极线 \mathbf{l}' 上，因而有

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{l}' = 0 \quad (7.1.8)$$

因而从式(7.1.6)得到

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{l}' = \frac{\lambda}{\lambda'} \mathbf{x}'^T [\mathbf{e}']_{\mathbf{x}} M M^+ \mathbf{x} = 0 \quad (7.1.9)$$

记基础矩阵

$$\mathbf{F} \equiv [\mathbf{e}']_{\mathbf{x}} M M^+ \quad (7.1.10)$$

因而得到用基础矩阵 \mathbf{F} 描述的两幅图像间的极线约束关系为

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F} \mathbf{x} = 0 \quad (7.1.11)$$

由于 $[\mathbf{e}']_{\mathbf{x}}$ 秩为 2， $M M^+$ 秩为 3，因而基础矩阵 \mathbf{F} 是一个秩 2 的 3×3 维矩阵，有 7 个自由度。

(2) 基于极线约束的特征点匹配

根据极线约束，搜索一个特征点在另一幅图像上的对应同名点就可以由在整幅图像

上进行二维搜索变为沿极线进行一维搜索。如在图 7.1.1 中，如果两次成像的相对关系已知，就可以根据 X 点在图像 S 上的像点 x 和基线 CC' 确定极平面 π ；而平面 π 与像平面 S' 的交线 l' 就是 S' 上的对应极线，并且 x 的匹配点 x' 必然位于极线 l' 上；从而可以在 l' 上搜索匹配点 x'。

如果有三幅图像，并且空间点在其中两幅图像中的像点已经正确匹配，则可以根据极线约束直接确定该点在第三幅图像中的匹配位置。如图 7.1.2，X 点在图像 S₀、S₁、S₂ 中的像点分别为 x₀、x₁、x₂，其中 x₀ 和 x₁ 已经确定，则可以根据极线约束分别在图像 S₂ 中确定极线 l₂ 和 l'₂，根据极线约束，匹配点 x₂ 既在 l₂ 上，又在 l'₂ 上，从而极线 l₂ 和 l'₂ 的交点应该是匹配点 x₂ 的位置。

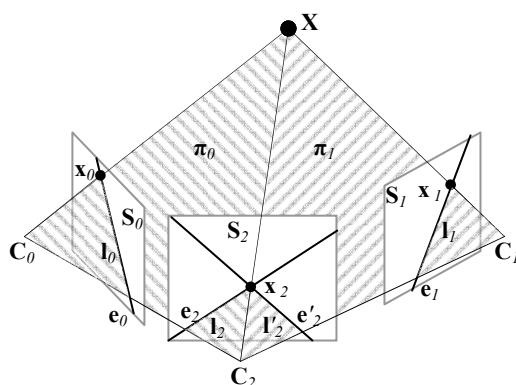


图 7.1.2 根据极线约束关系确定第三幅图像中的匹配点

根据极线约束确定匹配点所在的直线（两视图时）或点（三视图以上情况）后，就可以在以该直线为中心的直线带或以该点为中心的小区域中运用基于目标成像特征的匹配算法确定具体的匹配位置。

7.1.2 基于极线局部校正的特征点匹配

根据对极几何的立体成像关系，空间上极平面两侧小范围内场景在两个图像上的成像位于对应极线的两侧，如图 7.1.3。由于对应极线在两幅图像中的方向可能不同，也就是对应同一空间场景的图像之间存在旋转，会影响相关等匹配算法的效果。而如果将两图像上对应极线两侧范围的局部图像都旋转到极线水平状态，就可以消除两者之间的旋转变换，再运用基于目标成像特征的匹配算法，能够得到更加稳定、准确的匹配结果。

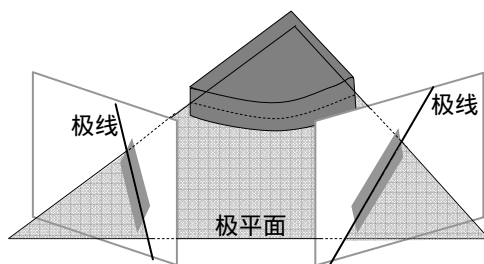


图 7.1.3 极平面附近场景成像在以极线为中心的直线带

根据上述原理，我们提出了基于极线局部校正的匹配算法^[4]。该算法将待匹配两图像上极线两侧较小范围的区域以极点为圆心进行旋转，使两幅图像的对应极线都到达水平状态（也可以只旋转其中一幅图像的极线附近区域，使该极线与另一幅图像的对应极线平行）；再在旋转后的图像中选择特征模板，在另一个图像上沿旋转后的极线在极线局部区域内采用最小二乘相关等算法搜索最佳匹配点。

利用上述方法对数码相机在不同位置不同角度拍照的建筑物图像对进行特征点匹配，其中一组匹配结果如图 7.1.4。多组实际场景实验表明，在图像对间没有严重遮蔽的情况下本算法都给出了令人满意的结果，对极线方向变化具有很好的适应性，匹配正确率明显优于没有进行极线局部校正的情况。



(a) 随机选取特征点

(b) 特征点匹配结果

图 7.1.4 极线局部校正的特征匹配实验结果

7.1.3 RANSAC 算法及其在特征点鲁棒匹配中的应用

为了较细致地测量目标表面三维结构和形状，通常需要提取大量特征点，并在序列图像间进行点匹配，再基于匹配结果进行三维重建。而如果有较多错匹配的野值点，会对三维重建结果造成较严重的影响。而 RANSAC 算法 (RANdom SAmple Consensus) 是一种很好的，能够剔除大比例野值的鲁棒估计算法^[5]。RANSAC 算法可以解决大量目标特征点的图像匹配中的错配问题，能够有效地剔除错匹配的野值点，在国际上相关领域得到广泛应用。

(1) RANSAC 算法基本原理

RANSAC 算法的思想是 随机选择满足解算所需的最少的观察点列来估计模型参数，再用其它点列与它的符合程度来评估该点列的正确性。根据含有野值的数据集 S ，用 RANSAC 算法估计该数据集所满足模型的过程是：

- 1) 随机从 S 中选择 n 个数据点组成一个样本 s ；
- 2) 根据 s 估计模型；
- 3) 确定 S 中偏离模型的距离小于给定阈值 t 的数据点集 S_i ；
- 4) 如果 S_i 中数据点的数目大于给定阈值 T ，则用 S_i 中的所有数据点估计模型并结束；
- 5) 如果 S_i 中数据点的数目小于阈值 T ，则选择一个新的子集 s ，重复以上过程。

经过上述过程，最终将得到较多的数据点都能够很好符合的模型估计结果，这一结果没有受到偏离模型距离较远的野值点的影响。而传统的最小二乘拟合等方法的结果受到野值点的影响较大。

(2) 在序列图像特征点匹配中应用 RANSAC 算法

前面已经介绍，序列图像三维重建中，大量同名点的建立过程是，首先基于目标成像特征约束完成部分特征点匹配，根据匹配结果解算序列图像之间的相对几何关系，再由多视图几何约束条件引导进行特征点匹配。

为了剔除第一次匹配中可能存在的匹配野值，采用上述 RANSAC 算法进行序列图像之间相对几何关系的模型估计，如估计后文将介绍的两视图间的基础矩阵、三视图间的三焦点张量等参数模型，获得不受野值影响的多视图几何约束条件，用于进一步解算。具体过程是：

- 1) 在序列图像中分别提取特征点，并基于目标成像特征约束进行特征点匹配；
- 2) 对于上述特征点匹配结果，重复 N 次采样，进行下述步骤 \sim ：

随机选取所需数量的匹配点，解算多视图几何约束关系的数学模型。

计算每一组特征点匹配结果偏离 中得到的几何约束关系的距离 d ，即计算各特征点与上一步得到的几何约束关系的符合程度；

统计距离 d 小于设定阈值的匹配点的数目，即模型内点数目；

- 3) 选择 N 次采样中内点最多的一组采样所对应的几何约束关系；

- 4) 利用上述内点数最多的一组特征点匹配结果，采用最小二乘等方法优化解算几何约束关系。

由于上述得到的匹配点还仅是利用了目标成像特征并用 RANSAC 算法剔除了可能的

错配点，但还没有利用图像间的几何约束关系进行匹配。因而还要进行下面的步骤：

5) 用所得到的图像间的几何约束关系引导校正图像特征点匹配结果，并用新的匹配结果重新解算几何约束关系。此步可迭代多次，直至得到稳定结果。

7.2 从未标定图像序列重建目标表面三维结构基本原理

3.4 节介绍的基于光束法平差和约束条件标定像机参数的方法，是在获得特征点和像机参数的初值后，采用光束法平差同时对像机参数和特征点坐标进行优化计算，也就是在标定像机参数的同时得到了目标三维结构的结果。而如果特征点坐标初值和像机参数为未知，可以在像机在多个方位采集目标的图像序列后，根据序列图像之间的约束关系，应用计算机视觉中讨论较多的基于未标定图像序列进行三维重建的技术，从非控制点的序列图像求解像机参数和特征点坐标，作为光束法平差等优化算法的初值^[1,2,6]。这种先通过基于未标定图像序列的三维重建得到初值，再应用摄影测量中成熟的光束法平差进行优化求解，得到高精度测量结果的方式，是计算机视觉方法与摄影测量方法相结合的典型，是摄像测量领域的热门研究方向之一^[7-9]。

Faugeras和Hartley于1992年提出了利用未标定图像序列计算射影结构的理论^[10,11]，在这种理论框架下，可以从未标定图像序列进行三维射影重建（即得到的可能是真实目标结构发生透视变形后的结果）。在射影重建基础上，给出进一步信息（如像机内参数），就可以从射影重建恢复欧氏度量，实现欧氏重建（得到真实的目标结构结果）。这种两步计算结构称为分层重建^[11,12]。

关于三维重建和自标定的算法研究很多，读者可以参阅有关文献^[7-9,13]。本节介绍一种典型的基于因式分解的分层三维欧氏重建，以及基于求解Kruppa方程进行自标定的算法^[14]。

使像机在 m 个方位对 n 个特征点采图，假设在图像序列中已经对这些特征点进行了正确的提取和匹配。则按以下三个步骤进行三维重建和自标定，求解特征点空间位置和像机参数： 进行射影重建； 求解像机内参数，如果像机内参数为已知，则省去这一步； 在射影重建和已得到像机内参数的基础上进行欧氏重建。这一过程同时也完成了像机的自标定。

7.2.1 进行射影重建

为了使解算结果稳定，首先对特征点的像点坐标进行均匀缩放归一化，归一化后的图像坐标原点在特征点像点集的形心，归一化后特征点像点到归一化图像坐标原点的平

均距离为 $\sqrt{2}$ 。归一化图像坐标为

$$\begin{cases} \hat{x} = \sqrt{2} \frac{x - \bar{x}}{\bar{d}} \\ \hat{y} = \sqrt{2} \frac{y - \bar{y}}{\bar{d}} \end{cases} \quad (7.2.1)$$

其中, (x, y) 为特征点像点图像坐标, (\bar{x}, \bar{y}) 为特征点像点集的形心, \bar{d} 为特征点像点到像点集形心的平均距离, (\hat{x}, \hat{y}) 为归一化的特征点像点图像坐标。

记特征点归一化像点的齐次坐标为 $\bar{\mathbf{x}}_{ji} \equiv [\hat{x}_{ji} \quad \hat{y}_{ji} \quad 1]^T$, 特征点空间坐标的齐次坐标为 $\bar{\mathbf{X}}_i \equiv [X_i \quad Y_i \quad Z_i \quad 1]^T$ 。将投影关系表示为

$$\lambda_{j,i} \bar{\mathbf{x}}_{j,i} = \mathbf{P}_j \bar{\mathbf{X}}_i \quad (7.2.2)$$

其中, $j = 0, 1, \dots, m-1$, $i = 0, 1, \dots, n-1$, $\bar{\mathbf{x}}_{j,i}$ 为像机在第 j 个方位时第 i 个特征点 $\bar{\mathbf{X}}_i$ 的归一化像点的齐次坐标, \mathbf{P}_j 称为像机在第 j 个方位时的像机矩阵 (即中心透视投影成像模型中的投影矩阵), $\lambda_{j,i}$ 为比例因子, 称为射影深度。将各个特征点在各幅图象中的成像关系连立, 得到该问题完整的关系为

$$\mathbf{W} \equiv \begin{bmatrix} \lambda_{0,0} \bar{\mathbf{x}}_{0,0} & \lambda_{0,1} \bar{\mathbf{x}}_{0,1} & \cdots & \lambda_{0,n-1} \bar{\mathbf{x}}_{0,n-1} \\ \lambda_{1,0} \bar{\mathbf{x}}_{1,0} & \lambda_{1,1} \bar{\mathbf{x}}_{1,1} & \cdots & \lambda_{1,n-1} \bar{\mathbf{x}}_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \lambda_{m-1,0} \bar{\mathbf{x}}_{m-1,0} & \lambda_{m-1,1} \bar{\mathbf{x}}_{m-1,1} & \cdots & \lambda_{m-1,n-1} \bar{\mathbf{x}}_{m-1,n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0 \\ \mathbf{P}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_{m-1} \end{bmatrix} [\bar{\mathbf{X}}_0 \quad \bar{\mathbf{X}}_1 \quad \cdots \quad \bar{\mathbf{X}}_{n-1}] \equiv \mathbf{P} \bar{\mathbf{X}} \quad (7.2.3)$$

其中, 像机矩阵 $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_0 \quad \mathbf{P}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{P}_{m-1}]^T$, 结构矩阵 $\bar{\mathbf{X}} = [\bar{\mathbf{X}}_0 \quad \bar{\mathbf{X}}_1 \quad \cdots \quad \bar{\mathbf{X}}_{n-1}]$, \mathbf{W} 称为测量矩阵。

将射影深度的初值全部取为 1, 得到 \mathbf{W} 的初值。对 \mathbf{W} 进行 SVD 分解 (奇异值分解)

$$\mathbf{W} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \quad (7.2.4)$$

对于理想情况, 测量矩阵 \mathbf{W} 的秩应为 4, 但由于数据误差, \mathbf{W} 的秩并不为 4, 因而对 \mathbf{W} 的分解结果进行秩 4 矫正, 作为测量矩阵的最佳近似:

$$\hat{\mathbf{W}} = \mathbf{U} \hat{\mathbf{D}} \mathbf{V}^T \quad (7.2.5)$$

其中, $\hat{\mathbf{D}}$ 是对 \mathbf{D} 除前 4 个对角元素外所有元素取零后得到的矩阵。则像机矩阵的射影重建为

$$\tilde{\mathbf{P}} = [\tilde{\mathbf{P}}_0 \quad \tilde{\mathbf{P}}_1 \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{P}}_{m-1}]^T = U\hat{D}^T \quad (7.2.6)$$

结构矩阵的射影重建为

$$\tilde{\mathbf{X}} = [\tilde{\mathbf{X}}_0 \quad \tilde{\mathbf{X}}_1 \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{X}}_{n-1}] = V^T \quad (7.2.7)$$

将结构矩阵和像机矩阵射影重建结果代入式(7.2.2)进行重投影，得到各射影深度 $\lambda_{j,i}$ 的新的估计。再用新的 $\lambda_{j,i}$ 计算测量矩阵和对新的测量矩阵进行 SVD 分解。如此迭代，直至收敛。至此，得到了像机矩阵和结构矩阵的射影重建结果，也就是得到了目标点空间位置的射影重建结果。

上述式(7.2.6)和(7.2.7)只是选择像机矩阵和结构矩阵的一种方式。实际上，如果 $\tilde{\mathbf{P}}$ 和 $\tilde{\mathbf{X}}$ 是像机矩阵和结构矩阵的射影重建，则对于任意 4×4 非奇异矩阵 \mathbf{H} ， $\tilde{\mathbf{P}}\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{X}}$ 也是像机矩阵和结构矩阵的射影重建结果。因而，这一射影重建结果可能会与真实像机参数和目标结构相差一个三维射影变换，也就是与真实结果之间存在某种透视变形。

7.2.2 进行像机内参数的自标定

设像机在第 j_0 、 j_1 两个方位各采一幅图像，则存在如下式的 Kruppa 方程^[15~17]：

$$\mathbf{F}\mathbf{C}\mathbf{F}^T = s[\mathbf{e}_{j_1}]_x \mathbf{C}[\mathbf{e}_{j_1}]_x^T \quad (7.2.8)$$

其中， s 为比例因子， \mathbf{F} 是 7.1 节介绍的两帧图像间的基础矩阵， \mathbf{e}_{j_1} 是第 j_1 帧图像极点的齐次坐标。 \mathbf{F} 和 \mathbf{e}_{j_1} 都可以直接通过两帧图像特征点间的对应关系计算得到^[1~3]。

$\mathbf{C} = \mathbf{K}\mathbf{K}^T$ ， \mathbf{K} 为像机内参数矩阵（也称为标定阵）。 $[\mathbf{e}_{j_1}]_x$ 为由矢量

$\mathbf{e}_{j_1} = [e_{j_1,0} \quad e_{j_1,1} \quad e_{j_1,2}]^T$ 定义的对称矩阵：

$$[\mathbf{e}_{j_1}]_x = \begin{bmatrix} 0 & -e_{j_1,2} & e_{j_1,1} \\ e_{j_1,2} & 0 & -e_{j_1,0} \\ -e_{j_1,1} & e_{j_1,0} & 0 \end{bmatrix} \quad (7.2.9)$$

关于 Kruppa 方程的导出可以参阅文献[17]。通过求解 Kruppa 方程得到矩阵 \mathbf{C} ，再对 \mathbf{C} 进行 Cholesky 分解可以得到 \mathbf{K} ，从而得到像机内参数。求解 Kruppa 方程的方法有直接线性求解、数学规划等^[16]。

设在各个采图方位像机内参数保持不变。由于在得到像机参数和目标结构参数初值后，还要通过光束法平差等对其进行优化，可以将像机主点的初值取在图像中心，并令

水平和竖直方向的等效焦距的初值相同，记为 F ，则待求解的内参数只有等效焦距 F 。此时可以较简单地从 Kruppa 方程求解等效焦距 F ，过程如下。

令水平和竖直方向的等效焦距值相同，内参数矩阵成为

$$K = \begin{bmatrix} F & 0 & C_x \\ 0 & F & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.2.10)$$

设基础矩阵 \mathbf{F} 为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_0 & F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 & F_5 \\ F_6 & F_7 & F_8 \end{bmatrix} \quad (7.2.11)$$

将式(7.2.9)~(7.2.11)代入 Kruppa 方程式(7.2.8)，得到

$$\begin{bmatrix} F_0 & F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 & F_5 \\ F_6 & F_7 & F_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^2 + C_x^2 & C_x C_y & C_x \\ C_x C_y & f^2 + C_y^2 & C_y \\ C_x & C_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 & F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 & F_5 \\ F_6 & F_7 & F_8 \end{bmatrix}^T \\ = s \begin{bmatrix} 0 & -e_{j1,2} & e_{j1,1} \\ e_{j1,2} & 0 & -e_{j1,0} \\ -e_{j1,1} & e_{j1,0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^2 + C_x^2 & C_x C_y & C_x \\ C_x C_y & f^2 + C_y^2 & C_y \\ C_x & C_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -e_{j1,2} & e_{j1,1} \\ e_{j1,2} & 0 & -e_{j1,0} \\ -e_{j1,1} & e_{j1,0} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7.2.12)$$

将式(7.2.12)展开并用前两列分别除以第三列可以消去比例因子 s ，从而得到关于 F^2 的线性方程组，进而求得等效焦距 F 。

7.2.3 进行欧氏重建

由于射影重建结果可能会与真实相机参数和目标结构相差一个三维射影变换，对于任意的 4×4 非奇异矩阵 \mathbf{H} ，射影重建结果 $\tilde{\mathbf{P}}$ 、 $\tilde{\mathbf{X}}$ 与欧氏重建结果 $\hat{\mathbf{P}}$ 、 $\hat{\mathbf{X}}$ 满足

$$\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{P}}\mathbf{H}\mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{X}} \quad (7.2.13)$$

为从射影重建结果进一步得到描述真实目标结构的欧氏重建结果，应使 \mathbf{H} 满足

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{P}}\mathbf{H} \\ \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{H}^{-1}\tilde{\mathbf{X}} \end{cases} \quad (7.2.14)$$

根据中心透视投影关系，第 j 个方位时相机矩阵的欧氏重建形式应为

$$\hat{\mathbf{P}}_j = \tilde{\mathbf{P}}_j\mathbf{H} = K_j \begin{bmatrix} R_j & T_j \end{bmatrix} \quad (7.2.15)$$

其中, K_j 为第 j 个方位时像机的内参数矩阵, R_j 、 T_j 为第 j 个方位时像机的旋转矩阵和平移向量。

将 4×4 的 \mathbf{H} 阵改写为

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_{11} \quad \mathbf{h}_{12}] \quad (7.2.16)$$

其中 \mathbf{H}_{11} 为 \mathbf{H} 的前三列元素构成的 4×3 阶矩阵, \mathbf{h}_{12} 为 \mathbf{H} 的最后一列。因而从式(7.2.15)得到

$$\tilde{\mathbf{P}}_j \mathbf{H}_{11} = K_j R_j \quad (7.2.17)$$

式(7.2.17)等号两侧取转置为

$$\mathbf{H}_{11}^T \tilde{\mathbf{P}}_j^T = R_j^T K_j^T \quad (7.2.18)$$

由于旋转矩阵 R_j 为单位正交阵, 则有

$$\tilde{\mathbf{P}}_j \mathbf{H}_{11} \mathbf{H}_{11}^T \tilde{\mathbf{P}}_j^T = K_j R R_j^T K_j^T = K_j K_j^T \quad (7.2.19)$$

记 $\mathbf{G} = \mathbf{H}_{11} \mathbf{H}_{11}^T$, 则得到关于 \mathbf{G} 的线性方程组

$$\tilde{\mathbf{P}}_j \mathbf{G} \tilde{\mathbf{P}}_j^T = K_j K_j^T \quad (7.2.20)$$

从中可解出 \mathbf{G} 。 \mathbf{G} 为 4×4 对称矩阵, 而 \mathbf{H}_{11} 为 4×3 矩阵, 故对 \mathbf{G} 进行 SVD 分解得

$$\mathbf{G} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \sigma_0 & & & \\ & \sigma_1 & & \\ & & \sigma_2 & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^T = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_0} & & & \\ & \sqrt{\sigma_1} & & \\ & & \sqrt{\sigma_2} & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_0} & & & \\ & \sqrt{\sigma_1} & & \\ & & \sqrt{\sigma_2} & \\ & & & 0 \end{bmatrix}^T \mathbf{A}^T \quad (7.2.21)$$

令 \mathbf{A}_{11} 为 \mathbf{A} 的前三列元素组成的 4×3 矩阵, 则可以得到

$$\mathbf{H}_{11} = \mathbf{A}_{11} \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_0} & & \\ & \sqrt{\sigma_1} & \\ & & \sqrt{\sigma_2} \end{bmatrix} \quad (7.2.22)$$

在 $\bar{\mathbf{X}}$ 中取一点 $\bar{\mathbf{X}}_{i_0}$ 作为欧氏坐标原点, 则根据式(7.2.14)第二式有

$$[0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T = \mathbf{H}^{-1} \tilde{\mathbf{X}}_{i_0} \quad (7.2.23)$$

即

$$\mathbf{H} [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T = \tilde{\mathbf{X}}_{i_0} \quad (7.2.24)$$

所以 \mathbf{H} 的最后一列 \mathbf{h}_{12} 为

$$\mathbf{h}_{12} = \tilde{\mathbf{X}}_{i0} \quad (7.2.25)$$

至此得到了满足式(7.2.14)的 \mathbf{H} ，将 \mathbf{H} 和射影重建结果 $\tilde{\mathbf{P}}$ 、 $\tilde{\mathbf{X}}$ 代入式(7.2.14)，就得到像机参数和目标三维结构参数（特征点三维坐标）的欧氏重建结果 $\hat{\mathbf{P}}$ 、 $\hat{\mathbf{X}}$ 。

由于尚未利用绝对尺度信息，以上的射影重建、自标定和欧氏重建都是在相差一个尺度比例因子的意义下进行的。通过给定某些特征点之间的实际距离等约束条件作为绝对尺度信息，就可以得到实际的目标表面三维结构重建结果。可以再根据实际问题的约定，将重建结果变换到所需的坐标系中。

7.3 从像机内参数已知的两视图测量目标表面三维结构

在像机内参数已知的条件下，可以仅根据两幅图像之间的对极几何约束测量目标表面若干特征点的空间三维位置^[1]。相对于从图像序列中的更多幅图像进行三维重建，从两视图测量目标表面结构的算法简单、快速，容易得到较多的同名匹配点，在实际中被广泛使用。并且当两次成像之间形成较好的交会角度时，也能够得到较高精度的测量结果。这对于像机内参数已经过事先标定并在使用中保持不变，而需要实时进行三维重建的摄像测量任务非常有意义。第八章将介绍的基于机载序列图像三维地形重建进行地形匹配导航技术中，就采用从图像序列中选取关键帧并基于两视图对地面点进行三维重建的方法。

7.3.1 本质矩阵

为了从两视图进行三维重建，需要计算基础矩阵和本质矩阵。其中 7.1 节介绍的基础矩阵描述了两幅图像之间的对极几何关系，而本质矩阵是归一化图像坐标下的基础矩阵。

对于两幅图像中的同名像点 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}' ，根据内参数对图像坐标进行归一化，即

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}, \quad \hat{\mathbf{x}}' = \mathbf{K}'^{-1}\mathbf{x}' \quad (7.3.1)$$

其中 \mathbf{K} 和 \mathbf{K}' 为由两幅图像像机内参数构成的内参数矩阵，形式如式(7.1.1)。将式(7.3.1)代入由基础矩阵描述的基线约束关系式(7.1.11)，得到

$$\hat{\mathbf{x}}'^T \mathbf{K}'^T \mathbf{F} \mathbf{K} \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}'^T \mathbf{E} \hat{\mathbf{x}} = 0 \quad (7.3.2)$$

其中 \mathbf{E} 称为本质矩阵，也就是归一化图像坐标下的基础矩阵。可见本质矩阵与基础矩阵的关系是

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}'^T \mathbf{F} \mathbf{K} \quad (7.3.3)$$

由于已根据内参数对图像坐标进行归一化，因而本质矩阵只与两次成像之间的相对

位置、姿态有关。设两次成像之间的平移向量和旋转矩阵为 T 和 R ，即以第一次成像的像机坐标系为基准，则第一次成像的像机平移向量为 $[0, 0, 0]^T$ ，旋转矩阵为单位阵，而第二次成像的像机外参数为平移向量 T 和旋转矩阵 R 。并且由于已对图像坐标进行归一化，因而两次成像的投影矩阵分别为 $M=[\mathbf{I} \ \mathbf{0}]$ 和 $M'=[R \ T]$ ，其中 \mathbf{I} 为 3×3 单位阵， $\mathbf{0}$ 为 3 阶零向量。则 M 的伪逆为 $M^+=[\mathbf{I} \ \mathbf{0}]^T$ 。而第一次成像的像机光心为 $C=[\mathbf{0}^T \ \lambda_e]^T$ 。将这些条件代入式(7.1.5)和(7.1.10)，得到此时的基础矩阵，即本质矩阵：

$$\mathbf{E} = \left[\begin{array}{c} \frac{1}{\lambda_e} M' C \\ \lambda_e \end{array} \right]_x M' M^+ = \left[\begin{array}{c} \frac{1}{\lambda_e} [R \ T] [\mathbf{0}^T \ \lambda_e]^T \\ \lambda_e \end{array} \right]_x [R \ T] [\mathbf{I} \ \mathbf{0}]^T \quad (7.3.4)$$

由于 $\frac{1}{\lambda_e} [R \ T] [\mathbf{0}^T \ \lambda_e]^T = T$ ， $[R \ T] [\mathbf{I} \ \mathbf{0}]^T = R$ ，因而

$$\mathbf{E} = [T]_x R \quad (7.3.5)$$

其中 $[T]_x$ 为由矢量 $T=[T_x, T_y, T_z]^T$ 定义的反对称矩阵。

7.3.2 求解基础矩阵并交会计算空间点

根据式(7.1.11)，确定两幅图像中 7 对同名点匹配结果就可以计算基础矩阵 \mathbf{F} ，而有 8 对以上匹配点时，可以线性求解基础矩阵。由于像机内参数 K 和 K' 为已知，根据式(7.3.3)可以计算本质矩阵 \mathbf{E} 。再根据式(7.3.5)，通过对本质矩阵进行奇异值分解 (SVD) 得到两次成像之间的平移向量 T 和旋转矩阵 R ^[1]。像机内参数以及两次成像之间的相对位置、姿态关系都得到后，以第一次成像的像机坐标系为基准，将第一次成像的像机平移向量取为 $[0, 0, 0]^T$ ，旋转矩阵取为单位阵（即旋转角取为 $[0, 0, 0]^T$ ），而第二次成像的像机外参数取上面得到的平移向量 T 和旋转矩阵 R 。这样就可以采用最基本的双目线-线交会方法，计算各个空间点在第一次成像的像机坐标系中的三维位置。

上述测量过程中需要提供绝对尺度信息，如场景中某两点之间的距离，或两次成像位置之间的距离等，否则只能得到相差一个尺度因子的目标表面三维结构测量结果。解算过程中，可以采用各种优化算法提高基础矩阵求解和空间点三维重建的稳定性和精度。

除了上述基于对极几何约束从像机内参数已知的两视图进行目标表面三维结构测量外，还可以根据三幅图像之间的三焦点张量约束从像机内参数已知的三视图进行目标表面三维结构测量。与基础矩阵描述两幅图像中同名点位置之间的约束关系类似，三焦点张量描述了三幅图像中的点或直线基元之间的对应关系^[1]。确定三幅图像中的 6 组同名点匹配结果就可以求解三焦点张量，当有 7 组以上匹配点时，可以线性求解三焦点张量。根据三焦点张量可以得到空间点的射影重建结果。再引入像机内参数，就可以进一步得

到空间点的三维欧氏重建结果。重建中同样需要提供绝对尺度信息，否则只能得到相差一个尺度因子的测量结果。详细的原理和算法可以参阅文献[1]。

7.4 摄像测量问题求解的全局优化方法

为了提高摄像测量结果的精度，通常在由线性算法得到初步结果后，再通过优化算法得到高精度的最终结果。例如 2.4 节介绍的光束法平差，就是从观测数据中对获得的初值进行优化，高精度地得到最终结果的一类基本方法。然而包括光束法平差在内的许多成熟的优化算法，都属于局部优化方法，对初值要求较高。如果目标函数有多个极值，在给定的初值不合适时，局部优化方法可能会收敛到局部极值点。

全局优化方法的优点是不依赖初值，而能稳定地收敛到目标函数的全局最值位置。全局优化方法是目前数学界比较前沿的研究内容，包括区间算法、填充函数法、分支定界法、模拟退火法、遗传算法等^[18-20]。而在摄影测量和计算机视觉界，摄像测量问题的全局优化求解还属于很新的研究领域。

2005 年，Fredrik Kahl 提出了一种应用前景看好的视觉问题全局优化解决方法，该方法采用非凸问题全局优化的 LMI (linear matrix inequalities, 线性矩阵不等式) 松弛优化方法求解多种摄像测量问题的全局最优解^[21,22]。该方法在全局优化求解目标三维结构、像机相对于目标的三维位置、姿态等方面，能够达到与光束法平差相当的精度。Fredrik Kahl 在 2005 年因提出该方法获国际计算机视觉界的最高荣誉——国际计算机视觉大会马尔奖。

摄像测量三维重建问题通常可以转化为最小化目标函数为有理多项式的最优化问题。Fredrik Kahl 进一步将其转化为 LMI 凸优化问题，而对于这类优化问题已有成熟的算法^[23,24]。Fredrik Kahl 选用了凸半定规划 (convex semidefinite programming, SDP) 算法进行 LMI 凸优化^[25]。下面简单介绍该全局优化方法将非凸优化问题松弛化为 LMI 凸优化问题的基本原理。

7.4.1 凸集、凸函数和凸优化问题^[20]

1) 凸集 : 如果一个集合中任意两点的连接线段含于该集合之中，则称该集合为凸集。如图 7.4.1(a) 为凸集，(b) 为非凸集。

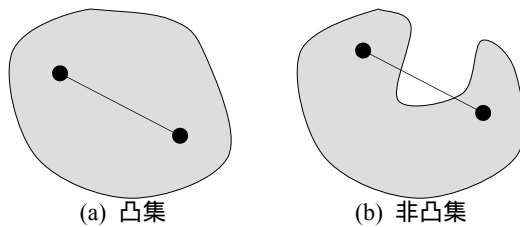


图 7.4.1 凸集和非凸集

2) 凸函数：定义在凸集 S 上的函数 $f(x)$ ，如果对于任意 $x_1, x_2 \in S$ 和 $0 < \lambda < 1$ ，总有

$$f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2) \quad (7.4.1)$$

则称 $f(x)$ 为 S 上的凸函数，如图 7.4.2(a) 为一个凸函数。凸函数有唯一的极小值。

3) 优化问题和凸优化问题

最优化问题的一般形式是

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & x \in S \end{aligned} \quad (7.4.2)$$

其中 x 为待优化参数， $f(x)$ 称目标函数，“min”表示对目标函数进行最小化，“s.t.”意为“受约束于 (subject to)”， S 称为可行域。最优化问题就是在可行域 S 中确定使目标函数 $f(x)$ 最小的 x 的值。对于最大化问题 $\max\{f(x): x \in S\}$ 可以等价于最小化问题 $\min\{-f(x): x \in S\}$ 。如果可行域为凸集，目标函数为凸函数，最优化问题就成为凸优化问题。对于凸优化问题，目标函数的极值点是唯一的，则局部优化算法就能够收敛到全局最优解，如图 7.4.2(a)。而对于非凸优化问题，如果目标函数有多个极值点，则当初值选取不合适时，局部优化算法会收敛到局部极值点，如图 7.4.2(b)。对于凸优化问题，现有很多成熟的算法。而将非凸优化问题转化为凸优化问题是进行全局优化的一个重要途径。

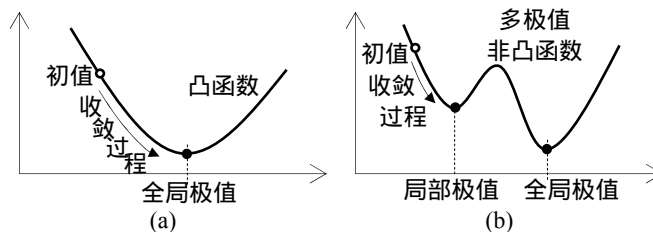


图 7.4.2 凸函数和有多极值点的非凸函数

7.4.2 将非凸多项式函数优化问题 LMI 松弛为凸优化问题的过程

多项式优化问题的一般形式是

$$\begin{aligned} \min \quad & g_0(x) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(x) \leq 0, \quad i=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (7.4.3)$$

其中 $g_i(\mathbf{x})$ 为待优化参数 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的多项式。设该优化问题的目标函数存在最小值 p^* ，LMI 松弛优化方法通过将目标函数转化为下界更低的凸函数，将可行域转化为其凸包络，使得多极值非凸优化问题可以转化为凸优化问题进行求解。对多项式优化问题的凸化松弛通过逐步对待优化参数、目标函数、约束条件的“提升 (lifting)”来实现。

(1) LMI 松弛技术示例

考虑下面的非凸优化问题：

$$\begin{aligned} p^* &= \min -x_2 \\ \text{s.t. } g_1(x) &= 3 + 2x_2 - x_1^2 - x_2^2 \leq 0 \\ g_2(x) &= -x_1 - x_2 - x_1x_2 \leq 0 \\ g_3(x) &= 1 + x_1x_2 \leq 0 \end{aligned} \quad (7.4.4)$$

该问题的目标函数是线性函数，可行域是非凸集，目标函数的最小值 $p^* = -1.618$ ，如图 7.4.3(a)。

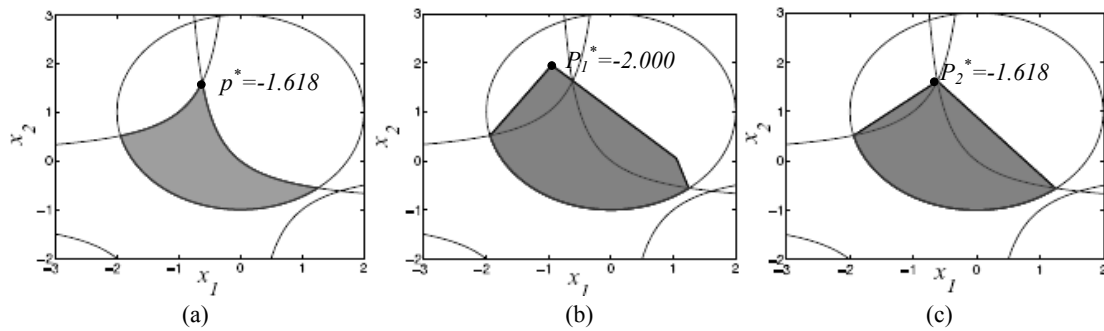


图 7.4.3 非凸可行域经 LMI 松弛为凸可行域过程

进行单项式替换 $y_{klk2} = x_1^{k1} x_2^{k2}$ ，并取一阶多项式基 $v_1(x) = [1 \quad x_1 \quad x_2]^T$ ，对该优化问题进行第一次 LMI 松弛得到

$$\begin{aligned} \min & -y_{01} \\ \text{s.t. } & 3 + 2y_{01} - y_{20} - y_{02} \leq 0 \\ & -y_{10} - y_{01} - y_{11} \leq 0 \\ & 1 + y_{11} \leq 0 \end{aligned} \quad (7.4.5)$$

$$v_1(x)v_1(x)^T = \begin{bmatrix} 1 & y_{10} & y_{01} \\ y_{10} & y_{20} & y_{11} \\ y_{01} & y_{11} & y_{02} \end{bmatrix} \succeq 0$$

其中 $v_1(x)v_1(x)^T \succeq 0$ 表示 $v_1(x)v_1(x)^T$ 为半定矩阵。这样，优化问题(7.4.4)成为一个线性的凸优化问题，其凸的可行域在 (y_{10}, y_{01}) 平面的投影如图 7.4.3(b)，该可行域包含了原

非凸优化问题的可行域，目标函数最小值为 $p_1^* = -2.000$ ，最小值点在原非凸优化问题可行域之外。

再进行第二次 LMI 松弛，取二阶多项式基 $v_2(x) = [1 \ x_1 \ x_2 \ x_1^2 \ x_1x_2 \ x_2^2]^T$ ，并构造半定矩阵 $v_2(x)v_2(x)^T$ 。同时将 (7.4.5) 的前三项约束条件分别与 $v_1(x)v_1(x)^T$ 作积，得

$$\begin{aligned} \min \quad & -y_{01} \\ \text{s.t.} \quad & (3 + 2y_{01} - y_{20} - y_{02})v_1(x)v_1(x)^T \geq 0 \\ & (-y_{10} - y_{01} - y_{11})v_1(x)v_1(x)^T \geq 0 \\ & (1 + y_{11})v_1(x)v_1(x)^T \geq 0 \\ & v_2(x)v_2(x)^T \geq 0 \end{aligned} \quad (7.4.6)$$

其凸的可行域在 (y_{10}, y_{01}) 平面的投影如图 7.4.3(c)，该可行域包含在第一次 LMI 松弛可行域之内，并且是原非凸优化问题可行域的凸包络。这样，优化问题(7.4.4)被松弛为线性凸优化问题(7.4.6)，并且目标函数最小值为 $p_2^* = -1.618$ ，最小值点 $(y_{10}^*, y_{01}^*) = (-0.618, 1.618)$ ，与原非凸优化问题的结果一致。这实际上就是完成了将非凸优化问题松弛为 LMI 凸优化问题，而这一 LMI 凸优化问题是最优化理论中成熟的半定规划问题。

(2) LMI 松弛的一般过程

对于形如式(7.4.3)的一般形式的多项式优化问题，对其进行 δ 次 LMI 松弛的一般过程是：

采用提升格式 $y_{k_1 k_2 \dots k_n} = x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n}$ ，线性化目标函数 $g_0(x)$ ；

构造 $\delta-1$ 阶多项式基 $v_{\delta-1}(x)$ ，将约束条件 $g_i(x) \geq 0$ 提升为 LMI 约束 $g_i(x)v_{\delta-1}(x)v_{\delta-1}(x)^T \geq 0$ ，其中 $i=1, 2, \dots, m$ ；

加入 LMI 矩阵约束 $v_{\delta}(x)v_{\delta}(x)^T \geq 0$ 。

经过上述松弛过程，就能够将最小值为 p^* 的非凸优化问题转化为最小值为 p_{δ}^* 的 LMI 凸优化问题，可以作为半定规划问题进行求解。并且进行足够次数的 LMI 松弛，能够使得 $p_{\delta}^* = p^*$ ，也就是所得到的 LMI 凸优化问题的解就是原非凸优化问题的解。文献[24]给出了对这一结论的证明。

Fredrik Kahl 还提出了一种 L_{∞} 范数下的摄像测量问题全局优化的 SOCP (Second Order Cone Program, 二次圆锥规划) 优化方法，也取得了很好的优化效果。其原理可参阅文献 [26]。摄像测量问题的全局优化求解研究新成果值得我们重视和期待。

7.5 结构光三维测量法

前述的从序列图像进行三维重建以及通过线-线交会进行三维测量的过程中，一个基本条件是像机在不同方位拍摄的图像中，需要找到对应于同一目标特征点的像，即匹配同名点，再解算特征点的空间三维位置。同名点匹配是这些三维摄像测量中最基本、最重要的要求之一。当物体表面有较明显的特征点时，这种同名点配准并不困难。当物体表面有一定量的特征点时，可以匹配这些同名特征点，并解算它们的三维位置，从而获得目标表面基本三维结构的测量结果。而如果希望测量得到物体的三维表面形状，就需要重建密集的表面点。但多数物体表面没有密集特征点，无法通过序列图像重建或多像机交会测量三维表面形状。

结构光三维测量法是近二、三十年迅速发展起来的表面连续三维测量技术。结构光技术具有非接触连续表面测量、不需要对物体表面制作纹理、精度高、可测面积大、适应性强等许多优点，在表面三维重建和反求工程中得到了广泛应用，已有许多工程化产品和商品。本节对结构光测量法的基本原理作概要介绍，详情请查阅有关文献。

结构光三维测量是基于双像机线-线交会测量的原理，但是将双像机交会中的某一个像机用事先约定和标定好的结构光投射器来代替，只要将每条结构光投影射线与其对应的物面上图像像点匹配上，就同样可以进行线-线交会，测量出三维物体形状。结构光测量系统主要由结构光投射器、摄像机、图像处理系统组成。结构光的类型主要有条纹光栅、正交光栅、圆形光栅、点阵、交叉线、空间编码模板等。根据不同的应用对象，可设计不同的结构光形式，构成不同的结构光测量系统。下面对几种常用、简单的结构光三维表面形状测量原理作简要介绍。

7.5.1 单光束三维表面测量法^[27]

单光束三维表面测量法是结构光测量法的最简单情况。单光束三维表面测量系统通常由光源、摄像机和移动平台组成，并且光源与摄像机之间位置姿态关系固定。系统光源采用倾斜激光束，摄像机可为线阵或面阵 CCD 像机。图 7.5.1 为单光束表面测量原理图，其中 O_C 为摄像机光心， f 为焦距， η 为激光束入射角， φ 为像机光轴与参考平面法线的夹角。 f 、 η 和 φ 通过精确标定得到。 θ 为待测表面激光点和其在摄像机像面上所成的像点组成的射线与参考平面法线的夹角。根据像点提取结果计算视角 α ，则 $\theta = \alpha + \varphi$ 。 h 为待测表面到参考平面的距离，即需要测量的高度， y' 为入射光在待测表面和参考平面投影点之间距离在图像上的投影长度。则根据图中的几何关系， h 和 y' 满足：

$$y' = M \frac{h \sin(\eta + \theta)}{\cos \eta + (h/f) \text{ctg}(\eta + \theta)} \quad (7.5.1)$$

其中 M 为摄像机放大倍数，通过对摄像系统作精确标定来获得。该公式的推导原理是典型的三角测量原理。实际上，将图 7.5.1 中的入射激光射线换成摄像机的光心、像点组成的射线就是典型的双目交会测量。

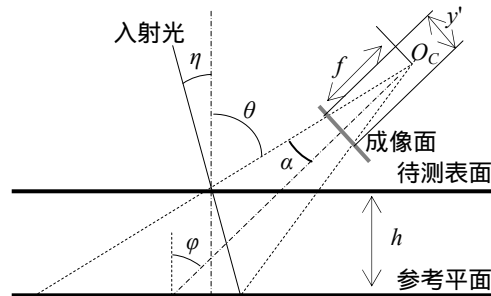


图 7.5.1 单光束表面测量原理

实际测量中，保持光源与摄像机固定不动，用移动平台移动被测物体进行扫描，完成整个表面的测量。其测量水平分辨率取决于移动装置的最小位移量。

为了简化计算，通常可取 $\theta=0$ ，如图 7.5.2 所示。此时待测表面第 (m, n) 个光反射点的坐标 (x_{mn}, y_{mn}, z_{mn}) 为

$$\begin{cases} x_{mn} = m\Delta x - \delta_{mn} \\ y_{mn} = n\Delta y \\ z_{mn} = (\delta_{mn} / M) \text{ctg} \eta \end{cases} \quad (7.5.2)$$

其中 Δx 和 Δy 分别是 x 和 y 方向每次移动的位移量， δ_{mn} 为表面反射光成像点和参考面反射成像点的距离， z_{mn} 就是待测表面到参考平面的距离 h_{mn} 。由上述原理可以方便地推广得到使用平面光束和面阵 CCD 测量三维曲面的方法。

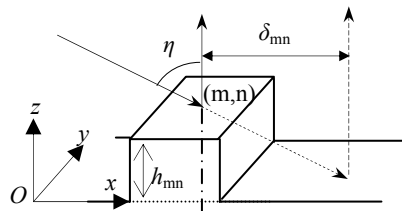


图 7.5.2 取 $\theta=0$ 时测量待测表面第 (m, n) 个光反射点原理

7.5.2 投影条纹法三维表面形状测量

(1) 投影条纹法基本原理

投影条纹法是结构光测量法中最常用、最成熟的方法技术。投影条纹法将光栅投影

于物体表面,在表面上形成由被测物体表面形状所调制的发生变形的光栅条纹图像,由处于另一位置的摄像机拍摄该条纹图像,如图 7.5.3,其中 7.5.4(b)的中部为变形的条纹图像。条纹的变形程度取决于投影系统与摄像机之间的相对位置姿态关系和物体表面形状。直观上,条纹在法线方向的位移(或偏移)与物体表面深度成正比例,扭曲表示了平面的变化,不连续显示了表面的物理突变或间隙。通过分析变形的条纹图像可测量物体表面的三维形状。

投影条纹法具有测量速度快、测量精度高、易自动化、柔性好、全场测量的特点,是国内外三维表面形状测量技术研究发展的重点^[28]。目前国际上一种比较广泛使用的高精度测量汽车、飞机等大型物体表面三维形状的方式是,将光束法平差优化测量合作标志点与投影条纹法测量表面形状相结合。首先在物体表面设置大量合作标志点,不需要已知这些标志点的位置;然后在不同方位拍摄目标的序列图像,并应用光束法平差优化法,基于序列图像高精度测量这些标志点的三维坐标;最后分区域应用投影条纹法测量局部表面形状,并根据标志点空间位置测量结果对局部表面形状进行拼接,得到目标整体的三维形状。如图 7.5.4 是对某汽车外形进行测量的一幅图像,汽车表面绘有合作标志,而投影条纹被汽车外形调制发生了变形。

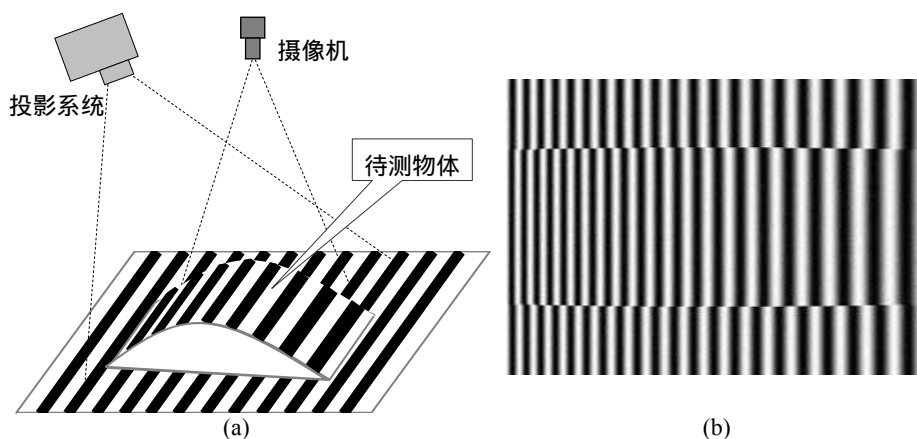


图 7.5.3 投影条纹法三维形状测量示意图



图 7.5.4 用于汽车外形测量的合作标志和投影条纹

(2) 投影条纹分析的相移法

从畸变的投影条纹图像分析目标表面形状的一类常用方法是位相测量轮廓术 (PMP), 该方法以测量投影到物体上的变形条纹图像的相位为基础, 通过相位与表面高度的映射关系得到被测物体的三维形状。位相测量轮廓术中常用相移法测量相位。相移法是在条纹图处理研究领域中最重要的发展和成果之一。它综合了各相移条纹的信息, 可以直接得到全场的相位分布, 而且由于利用多幅相移图得到比单幅图更多的信息, 因而能够得到比其它方法更高精度的结果。

相移法需要精密的相移装置和正弦性良好的条纹, 相移不准确和投影条纹的非正弦性会对测量引入高次谐波误差。随着投影方式从早期的幻灯机投影到现在的 LCD (Liquid Crystal Display) 及 DLP (Digital light processor) 投影的发展, 相移的准确性已可以得到较好的保证。LCD 和 DLP 的一个显著优点是具有可编程性, 可以根据需要在计算机内产生有一定相差的若干帧相移条纹, 然后按照相移顺序由结构光投射器依次投影到物体上, 实现相移。这种相移方法只要算法合理, 可以实现零相移误差, 避免由于相移不准引起的测量误差。

按投影方式一般可将相移法分为平行投影式和中心投影式, 分别如图 7.5.5(a)和(b)。其中 O_C 为像机光心, O_P 为投影系统光心。像机、投影系统和与像机光轴垂直的参考平面之间的相互关系已经事先标定, 需要测量的是待测表面上的各点 (如图中的 D 点) 离开参考平面的高度 (如图中的 h)。

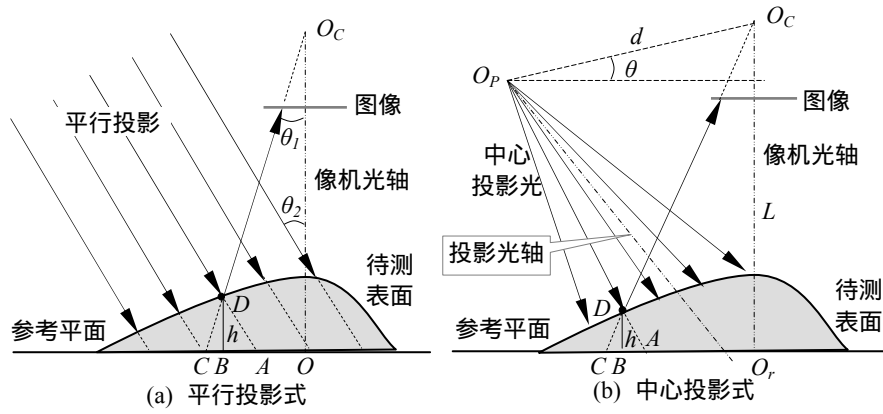


图 7.5.5 投影条纹法的投影方式

平行投影系统光路简单，但要求入射光线为平行光。构造大面积的平行入射光并不容易，所以平行投影系统的应用范围较窄。中心投影系统可用常用的投影仪作为投影光源，测量范围大，是普遍应用的投影系统。

使用投影仪投影正弦条纹到三维物体表面，摄像机摄取物体表面的变形条纹图，该图像为：

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\Phi(x, y)) \quad (7.5.3)$$

其中 $A(x, y)$ 为背景光强， $B(x, y) / A(x, y)$ 为条纹对比度，而位相函数 $\Phi(x, y)$ 包含了物体的三维形状信息。

式(7.5.3)中包含 $A(x, y)$ ， $B(x, y)$ 及 $\Phi(x, y)$ 三个未知数，要求解 $\Phi(x, y)$ 至少需要三幅条纹图。相移法是高精度求解 $\Phi(x, y)$ 的最常用方法。根据理论分析， N 帧满周期等间距算法对系统随机噪声具有最佳抑制效果，且对 $N-1$ 次以下的谐波不敏感，因此，一般采用该算法求解 $\Phi(x, y)$ 。通过改变输入投影仪的条纹图像，将投影条纹在一个周期内均匀平移 N ($N > 2$) 次，每次移动 $\delta = 2\pi / N$ ，则计算出 $\Phi(x, y)$ 的主值 $\varphi(x, y)$ ：

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n b_n}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n a_n} \right] \quad (7.5.4)$$

其中 $I_n = A(x, y) + B(x, y) \cos(\Phi(x, y) + n\delta)$ ，不同的 a_n 、 b_n 对应不同的相移算法。由式(7.5.4)计算出的位相分布被截断在 $[-\pi, \pi)$ 内，因而不再连续。为了从位相函数计算被测物体的完整高度分布，必须将由计算反三角函数引起的截断位相恢复成连续位相，这一过程称为相位解包裹。解包裹后的相位分布函数就是 $\Phi(x, y)$ 。对于复杂物体，相位解包裹是一个比较复杂和困难的问题，常用的解包裹方法有相位跟踪法、洪水解包法、区

域分析解包法、环线 0 跳跃和解包法、最小二乘全局解包法等^[29-31]。读者可参阅有关文献。

根据光学系统的结构和解包后的相位 $\Phi(x, y)$,可以计算待测表面点离开参考平面的高度,从而完成三维形状测量。如图 7.5.5 (b),待求解的是 D 点离开参考平面的高度 $h \equiv \overline{BD}$ 。根据图中的几何关系, h 与 \overline{AC} 满足:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{L - d \sin \theta} + \frac{d \cos \theta - \frac{d \sin \theta}{L} \overline{OrC}}{(L - d \sin \theta) \overline{AC}} \quad (7.5.5)$$

其中 L 为像机光心距参考平面的距离, d 为像机光心 O_c 与投影系统光心 O_p 的距离, θ 为 $O_c O_p$ 与图像平面的夹角。 L 、 d 、 θ 是系统参数,通过事先标定得到。 O_r 在像机光轴上,所以对应的成像位置在图像中心,其图像坐标为 $W/2$,其中 W 为图像宽度(像素),而 D 点和 C 点成像的图像坐标为 x ,所以 $\overline{OrC} = (W/2 - i)L/f$,其中 f 为已知的像机焦距。故而由(7.5.5)式求取 h 的关键是计算 \overline{AC} ,而 C 的位置已经得到,所以关键是 A 点位置的求取。

中心投影光线是发散的,在参考平面上的相位分布不是线性的,但在参考平面上每一点相对于参考点 O_r 的相位值是唯一和单调变化的,并且已在事先进行标定。A 点和 D 点位于同一投影光线上,所以参考平面上 A 点的相位与待测面上 D 点的相位相同。这样,当利用相移法与解包裹方法求得 D 点(A 点)的相位,就可以通过已事先标定的参考平面上点的位置与相位的关系求得 A 点的位置,从而得到 \overline{AC} ,再代入式(7.5.5)即可求出 h 。

以上仅对相移法的基本原理作了简要介绍,实际实施中,还要考虑投影仪的相差、摄像机的像差、系统标定、鲁棒解包裹和绝对级数确定等问题。需要说明的是,结构光法测量的是物体表面的三维形状,它与表面上具体的点没有确定关系,当表面发生变化时,结构光法无法知道表面上点的变化关系,因而无法确定实验力学中的表面变形或应变。而用多像机三维交会测量方法可以明确知道表面各点的对应变化情况,确定变形或应变。

7.5.3 云纹法三维表面测量

云纹法是一种传统的测量三维表面形状的技术,现在许多情况下它已让位于上述的投影结构光法。但是云纹法的几何干涉原理是一种通用的物理原理和物理现象,从事摄像测量的人士了解掌握它是大有益处的。下面简要介绍云纹法测量三维表面形状的基本

原理。

云纹法利用两组频率相近的栅线（条纹）叠加产生几何干涉形成云纹条纹图（莫尔条纹），进行面内和离面位移或变形的测量。将密栅结构光投射到被测物表面，由于物体高度信息的调制而使栅线发生畸变，畸变的栅线与主基准光栅干涉得到云纹图，对此云纹图进行处理即可获得被测物体的高度信息。利用这种栅线几何干涉原理，发展形成了各式各样的云纹测量法，例如影像云纹法、投影云纹法、面内云纹法、扫描云纹法、激光干涉云纹法、数字逻辑云纹法以及其它的改进方法，使云纹等值线测量技术满足不同的实用化要求。例如图 7.5.6 是一幅测量试件裂纹尖端面内位移场的面内云纹图。下面简要介绍几种云纹测量法^[32~34]。

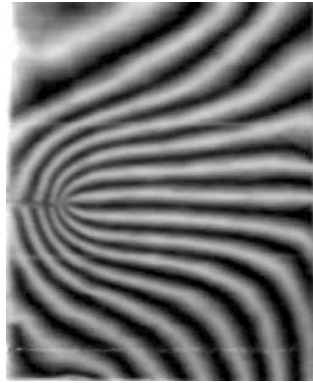


图 7.5.6 面内云纹图实例

(1) 影像云纹法

影像云纹法原理如图 7.5.7 所示，平行光照射到置于被测物体上的主基准光栅，其影像投在物体上。在摄像机像面上得到投影到物体表面的光栅和基准栅进行叠加的图像，产生几何干涉条纹图。

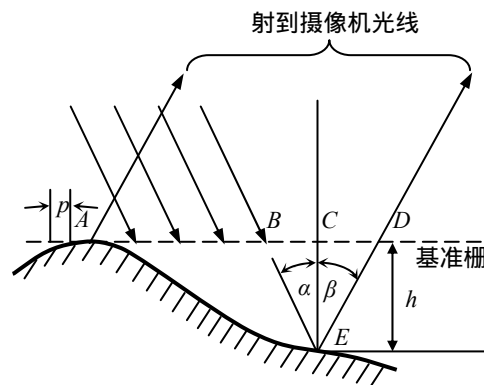


图 7.5.7 影像云纹法原理

设基准栅的节距(相邻栅线之间的间隔)为 p ,入射光与栅法线成 α 角,射到摄像机的光线与栅法线成 β 角, AB 和 AE 部分有 n 条栅线, AD 部分有 m 条栅线。则物体上 E 与光栅上 C 点的高度差 h 为

$$h = \frac{Np}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} \quad (7.5.6)$$

其中 $N=m-n$,为云纹条纹级数。

影像云纹法的特点是原理简单,易于实现,但由于制造面积较大的光栅很困难,故该方法只适用于小范围的测量。

(2) 投影云纹法

投影云纹法是将光栅投射到被测物体上,然后在观察面用第二个光栅(基准栅)观察物体表面的变形光栅图像。观察基准栅与投影变形光栅进行叠加,产生几何干涉云纹条纹图。分析云纹条纹就可以得到物体表面的深度信息。该方法可用于较大视场的测量。

(3) 扫描云纹法

扫描云纹法的投影方式与投影云纹法相同,但在观察面不是用光栅来形成云纹条纹,而是用电子扫描光栅与变形像叠加生成云纹等高线。它的优点是利用现代电子技术,可以很方便地改变扫描光栅栅距、位相等。生成不同位相的云纹等高线条纹图像,便于实现计算机自动处理。

参考文献

- [1] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.3.
- [4] 李立春. 基于极线局部校正的特征匹配方法[J]. 光学技术, 2007,
- [5] C.Longuet-Higgins. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections[J]. Nature, 1981(293): 133~135.
- [6] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. 自动化学报, 2003, 16(3): 110-124.
- [7] Mayer, H. Importance of Robust Least-Squares Adjustment for Orientation and Auto-Calibration of Wide-Baseline Image Sequences[C]. ISPRS Workshop in conjunction with ICCV 2005 "Towards Benchmarking Automated Calibration, Orientation and Surface Reconstruction from Images" (BenCos), Peking/China.
- [8] X. Hao, Mayer, H. Orientation and Auto-Calibration of Image Triplets and Sequences[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2003(34): Part 3 / W 8, S.

73-78.

- [9] Mayer, H. 3D Reconstruction and Visualization of Urban Scenes from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006(36): 5, 207–212.
- [10] O. Faugeras. What Can Be Seen in Three Dimensions with an Uncalibrated Stereo Rig[C]. Proceedings of ECCV'92, 1992: 563-578.
- [11] R. Hartley. Stereo from Uncalibrated Cameras[C]. Proceedings of CVPR'92, 1992: 761-764.
- [12] S. Granshaw. Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry[J]. Photogrammetric Record, 1980, 10(56): 181-207.
- [13] Mayer, H. Robust Orientation, Calibration and Disparity Estimation of Image Triplets Pattern Recognition[C]. 25th DAGM Symposium, Springer, Berlin, S. 2003: 281-288.
- [14] G. Frangois. Hierarchical Visual Perception with Calibration[R]. Report of Research, INRIA, France, 1996, No: 3002.
- [15] R. I. Hartley. Estimation of Relative Camera Positions for Uncalibrated Cameras[C]. Proceedings of the ECCV92, 1992: 379-387.
- [16] R. I. Hartley. In Defence of the 8-point Algorithm[C]. Cambridge(MA): Proceeding 5th International Conference on Computer Vision, 1995: 1064-1070.
- [17] S. Maybank, O. Faugeras. A Theory of Self-calibration of a Moving Camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [18] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [19] 徐增坤. 数学规划导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [20] 粟塔山等. 最优化计算原理与算法程序设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001.
- [21] F. Kahl, D. Henrion. Globally Optimal Estimates for Geometric Reconstruction Problems[C]. International Conference on Computer Vision, 2005, Beijing, China: 1002-1009.
- [22] F. Kahl, D. Henrion. Globally Optimal Estimates for Geometric Reconstruction Problems[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 3-15.
- [23] Henrion, D. Garulli, A. Positive Polynomials in Control. Lecture Notes in Control and Information Sciences[M]. Springer-Verlag: 2005.
- [24] Lasserre, J.B. Global optimization with polynomials and the problem of moments[J]. SIAM J. Optimization, 2001(11): 796-817.
- [25] Sturm, J.F. Using SeDuMi 1.02, a Matlab toolbox for optimization over symmetric cones[J]. Optimization Methods and Software, 1999, 1–12: 625–653.
- [26] Fredrik Kahl and Richard Hartley. Multiple-View Geometry under the L_1 -Norm[J]. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, 2008, 30(9):1603-1617.
- [27] Costa M F. Surface inspection by optical triangulation[J]. SPIE, 1994(2248) : 151-159.
- [28] 张广军, 王红, 赵慧洁等. 结构光三维视觉系统研究[J]. 航空学报, 1999, 20(4).
- [29] 雷志辉, 李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法[J]. 光学学报, 2006.
- [30] Qifeng Yu, Xiaohua Ding, Hongjun Oyang. A Calibration Method of Structured Light System With a planar Object[C]. SPIE, 2003(5144):420-430.

- [31] 惠梅, 王东生, 邓年茂等. 对移相误差不敏感的四帧相位算法[J].清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(8): 1017-1019.
- [32] Durelli A T, Parks V J. Moiré Analysis of Strain. New Jersey[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970.
- [33] Theocaris. Moiré Fringes in Strain Analysis[M]. London: Pergamon, 1969.
- [34] Patorski K, Kujawinska M. Handbook of The Moiré Fringes Technique[M]. Amsterdam-London-New York-Tokyo: Elsevier, 1993.

第八章 飞行器视觉导航方法与技术

飞行器视觉导航技术是近一、二十年以来国际上迅速发展起来的一种新型导航技术。它利用飞行器上安装的可见光/红外摄像机或成像雷达对地面成像，或利用地基/舰基的摄像机对飞行器拍摄图像，或用飞行器上的像机对另一飞行器成像，通过对序列图像进行处理测量，可以得到飞行器的位置、速度、姿态、高度和飞行方向等多种导航参数，或者得到两个飞行器之间的相对运动参数，从而为运动平台提供导航信息。飞行器视觉导航技术已经成为与惯性导航、天文导航、卫星导航和雷达导航等并列的导航技术，是导航领域的新兴前沿技术之一。

飞行器视觉导航技术具有被动测量、自成体系、不易受干扰、无时间累积误差、测量精度高、体积小、成本低、功耗小、可测参数多等诸多突出优点，具有广阔的应用发展前景。视觉导航与传统导航方法相比有许多优势。与惯性导航相比，视觉导航没有精度时间漂移、误差累积的问题，并且可以进行绝对定位，而对于长航时飞行器，惯导的漂移误差随时间累积，必须给予修正；与天文导航相比，视觉导航的定位精度高、可测量参数多、设备简单；与GPS等卫星导航相比，视觉导航自成体系、不受干扰、不受他国钳制；与雷达导航相比，视觉导航是被动测量、体积小、功耗低，距离越近精度越高。只要设计合理并条件许可，视觉导航可以得到与GPS导航同样的定位测速导航参数和同样的精度水平，而GPS卫星导航战时不为我用，许多飞行器的导航都不能把GPS作为主要依靠的导航手段。

飞行器视觉导航用途广泛，可以得到无人机（UAV）等飞行器自身的位置、高度、速度、姿态和飞行方向等多种导航参数，在飞行器的飞行控制、姿态确定和自主降落等领域起着重要的作用。在精确制导武器中的图像（视频）制导技术中的目标识别与目标跟踪锁定技术也是视觉导航的重要应用领域。

人们对视觉导航并不陌生，人的视觉是人体运动的天然导航手段。对于熟悉的环境，可以直接定位、定向；对于不熟悉的环境，可以通过识别路牌路标和地图来定位、定向，也可以用图片对环境景象进行匹配识别等。因而用视觉进行导航是再自然不过的事情了。在识别匹配目标完成后，用前面章节的摄像测量知识已可以完成多数导航信息的测量。但是直至到近年，飞行器视觉导航技术才开始进入初期实用阶段，主要原因是由于计算机视觉中两大技术障碍未能很好地突破：

一是对已知景象目标的高适应性实时匹配识别技术；

二是对已知特征目标的实时、可靠、有效的识别技术。

这两大关键技术虽然已有长足的进展，但仍属于尚未解决好的技术，其相关技术被美国DARPA（国防部高级研究计划署）、NASA（航空航天局）等国家机构列为最优先发展的关键技术之一，许多国际著名大学、研究机构都在积极开展这方面的研究。而对复杂、未知目标的实时可靠识别能力更是遥远将来的事情。本书第五章已经简要介绍了特征标志的识别和基于模板匹配的目标识别技术。更多的景象匹配与目标识别技术不属于本书的研究内容，相关知识请读者参见其它文献。本章只在具体的飞行器视觉导航技术介绍中简单提及所用到的匹配、识别方法。

根据不同的应用对象，视觉导航有不同的方法和技术，例如地面车辆的视觉导航是目前研究的热门领域之一，它有许多与飞行器视觉导航完全不同的方法和技术。飞行器视觉导航根据应用对象条件、所需提供的导航参数不同而又有许多不同的方法。例如仅利用飞行器上的实时图像序列，加上原有的高度计和惯性系统（INS），视觉导航技术可以提供飞行速度大小，但不能提供位置、速度方向等绝对量；而当飞行器上带有地面基准图时，不需要高度计和INS，仅利用实时图像序列，与基准图进行景象匹配就可以得到绝对位置、高度、速度大小和方向等量。

本章主要介绍、讨论飞行器视觉导航的方法和技术，重点是作者所在课题组的相关研究成果。

8.1 基于序列图像和测高数据的飞行器自测速方法

飞行速度是飞行器导航中的一个重要参数，特别是在某些需要通过速度来定位的应用领域，高精度测量速度是至关重要的。目前主要的速度测量方法有GPS测速、多普勒雷达测速、风速管测速等。GPS信号易受干扰和钳制；多普勒雷达体积和重量大，并且由于采用主动发射源，容易被对方发现；风速管测速本身精度不高，易受当地风速影响。

国际上已有利用无人机上的惯导、激光测距仪或雷达高度表和机上采集的序列图像，用光流法进行实时处理得到无人机速度大小的报道^[1]。我们发展了基于序列图像匹配跟踪的无人机自测速方法，通过匹配跟踪地面同名点在相邻两帧实时图中的位置，进行飞行器飞行速度大小的高精度测量^[2]。常规的无人机上都会配备惯导、高度计和摄像机，因此这种飞行器视觉导航的测速方法可以在不增加硬件设备的情况下实现。

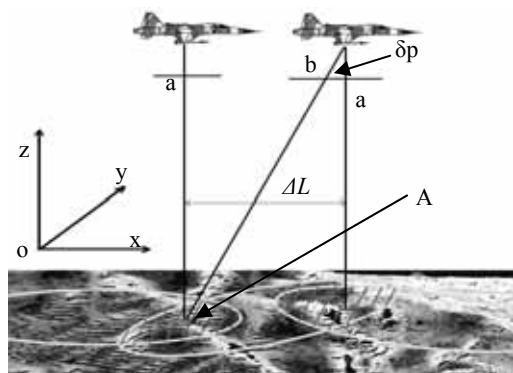
8.1.1 基于序列图像和测高数据的自测速方法原理

(1) 序列图像匹配自测速的基本模型

设摄像机正下视成像，匹配得到地面同名点在相邻两帧图像中的位置，在给出航高的情况下即可得到飞行器在相邻两次成像之间的位移，从而得到瞬时速度；在飞行器近似匀速直线飞行时，经多个瞬时速度平均即可得到高精度的平均轴向飞行速度。这一自测速的基本原理如图8.1.1所示。图8.1.1 (a)为飞行过程中相邻两个时刻对地面同一点成像的示意图，(b)表示地面同名点A在前后两帧图像中的位置分别为a、b。通过在两帧图中匹配地面同名点，就得到同名点在相邻两帧图中的平移量。当飞行器平飞、像机正下视、两次成像之间飞行高度不变时，则地面点A相对于飞行器的运动距离 δL 为

$$\delta L = \delta P \cdot H / f \quad (8.1.1)$$

其中 δP 为a与b之间的像素距离，通过匹配和跟踪图像点得到， H 为飞行高度，由雷达或激光高度表提供， f 为像机等效焦距，通过事先标定得到。上式表示图像上的位移量乘以实际图像放大倍数就得到飞行器的实际位移。



(a) 相邻两时刻对地面同名点 A 成像



(b) 同名点 A 在两帧图像中的匹配结果

图 8.1.1 序列图像匹配自测速基本原理

(2) 基于序列图像自测速的精确模型

实际飞行过程中像机并不是精确地正下视，并且相邻两次成像时飞行高度也不完全一致，导致图像有透视变形、图像缩放变化和像点产生位移。此时应当根据成像关系将倾斜影像校正为水平影像，并校正到同一比例尺下。

设成像时摄像机的俯仰角、滚转角、偏航角分别为 ψ 、 ω 、 κ 。如图 8.1.2。设地面坐

标系为 $W-XYZ$ ，摄像机坐标系为 $C-X_C Y_C Z_C$ ，校正后的水平影像坐标系为 $C-X'_C Y'_C Z'_C$ 。设地面点 A 和摄像机光心 C 在地面坐标系中的坐标分别为 (X_A, Y_A, Z_A) 和 (X_C, Y_C, Z_C) 。地面点 A 在倾斜影像和修正后的水平影像中的成像点分别为 $a(x, y)$ 和 $a'(x', y')$ 。摄像机在图像的 x 方向和 y 方向的视场角分别为 θ_x 和 θ_y ，等效焦距分别为 F_x 和 F_y ，图像主点为 (C_x, C_y) 。不考虑像差，根据中心投影成像关系式(2.1.11)和(2.1.22)，有

$$\begin{cases} \frac{x' - C_x}{F_x} = \frac{X_A}{H} \\ \frac{y' - C_y}{F_y} = \frac{Y_A}{H} \end{cases} \quad (8.1.2)$$

$$\begin{cases} \frac{x - C_x}{F_x} = \frac{r_0(X_A - X_C) + r_1(Y_A - Y_C) + r_2(Z_A - Z_C)}{r_6(X_A - X_C) + r_7(Y_A - Y_C) + r_8(Z_A - Z_C)} \\ \frac{y - C_y}{F_y} = \frac{r_3(X_A - X_C) + r_4(Y_A - Y_C) + r_5(Z_A - Z_C)}{r_6(X_A - X_C) + r_7(Y_A - Y_C) + r_8(Z_A - Z_C)} \end{cases} \quad (8.1.3)$$

其中 $r_0 \sim r_9$ 为旋转矩阵的元素。联立(8.1.2)和(8.1.3)两式即可得到 (x', y') 与 (x, y) 之间的关系，从而可以根据飞行姿态参数和据摄像机的安装参数计算摄像机在地面坐标系中的旋转矩阵，进而将倾斜影像修正为水平影像。

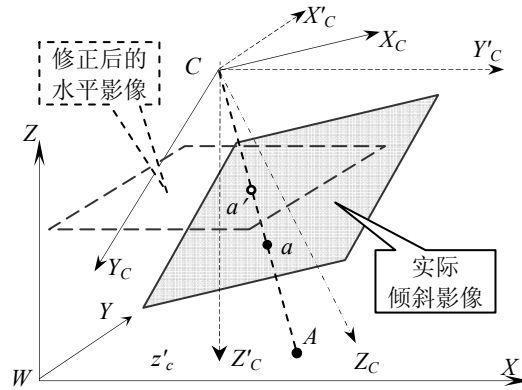


图 8.1.2 倾斜像片校正示意图

设 P_x 、 P_y 分别为图像 x 、 y 方向像素数的一半，则根据中心投影成像关系，等效焦距 $F_x = P_x / \tan \theta_x$ 、 $F_y = P_y / \tan \theta_y$ 。可以从(8.1.3)式得到地面点在第 i 和 $i+1$ 两个相邻时刻之间的位移为

$$\begin{cases} \Delta X = (x'_{i+1} - x'_i) \cdot H / F_x = \tan(\theta_x) \cdot (x'_{i+1} - x'_i) \cdot H / P_x \\ \Delta Y = (y'_{i+1} - y'_i) \cdot H / F_y = \tan(\theta_y) \cdot (y'_{i+1} - y'_i) \cdot H / P_y \end{cases} \quad (8.1.4)$$

其中 (x'_i, y'_i) 和 (x'_{i+1}, y'_{i+1}) 分别通过对实际成像点图像坐标 (x_i, y_i) 和 (x_{i+1}, y_{i+1}) 进行修正

得到。这样也就得到了飞行器相对于地面点的位移量，除以运动时间即得到飞行器的瞬时速度。再对一段时间的瞬时速度结果进行数据处理可以得到精度较高的平均速度或瞬时速度。经过一段时间的累加可得到飞行里程。

8.1.2 特征点及特征点匹配方法选取

上述自测速过程中，如何高精度、高可靠地实时匹配确定同名点在相邻帧图像中的位置是最关键的。原理上说，选取图像上任意一点或多点作为同名特征点都可以进行上述速度测量。但为了提高匹配的可靠性和精度，需要对匹配特征点的选取有所考虑。对此已有许多专门的研究和成果，其中基于Harris算子和Forstner算子的特征点检测方法是较常用的特征点选取准则^[3,4]。

当用于匹配跟踪的特征点确定后，最核心也是最困难的是如何高精度、实时地匹配确定此特征点在相邻帧图像中的位置。本书第五章中已经介绍了多种匹配跟踪算法。飞行器对地成像过程中存在地面背景比较复杂，光照变化比较剧烈，成像平台不稳定等因素，这些不利因素给序列图像带来亮度变化以及旋转、缩放、剪切等各种变形。为此，我们选用 5.3 节介绍的对光照变化和仿射变形不敏感的最小二乘匹配或基于生物视觉的匹配算法进行图像间同名点的匹配跟踪。

8.1.3 误差因素分析

除了与图像分辨率和特征点图像匹配精度有关外，上述飞行器自测速方法的主要误差来源包括飞行器姿态角误差、飞行高度误差和地物高度起伏变化的影响。

(1) 飞行器姿态角误差的影响

当飞行器姿态角存在误差时，会导致所安装的像机光轴姿态变化，使得通过图像坐标对地面点的定位存在一定的误差。若每次成像时飞行器姿态角均存在一个系统偏差，则对结果的影响比较小。但是如果飞行器姿态角为随机误差，就会对定位和测速结果产生较大影响。设在某一飞行高度下，像机光轴实际偏角为 5° ，而根据所给出的飞行器姿态角计算像机光轴偏角为 4.7° ，即存在 0.3° 的误差。则根据成像关系可以计算，由此带来的对地面点的定位误差为

$$\Delta = [\tan(5^\circ) - \tan(4.7^\circ)]H = 0.0053H \quad (8.1.5)$$

其中 H 为飞行高度。可见，当飞行高度超过100米时，对地面点的定位误差已经大于0.5米。而对于大量数据拟合计算平均飞行速度的情况，如果该姿态角误差为0均值随机分布（白噪声），可以通过数据平滑对其进行消除和抑制。

(2) 飞行高度误差的影响

同名点在图像上的运动距离转换到实际距离时，需要根据飞行高度来确定对地面的成像分辨率。实际飞行中的高度信息由雷达高度计或激光测距仪等提供，其误差包括系统误差和随机误差。对于随机误差可通过数据平滑进行消除和抑制。但系统误差将直接影响测量精度，若高程存在1%的系统误差，则测速结果也会存在1%的系统误差。

(3) 地物起伏变化的影响

如图8.1.3，以像机光轴垂直于地面为例，设地物点 M 距地面的高度为 h ， M 在地面的投影点为 A_0 ，像机光心 C 与 M 的连线交地面于 A 点， M 点和 A_0 点在像片上的像点分别为 a 和 a_0 ， M 点到像机光轴的距离为 D 。 A_0 为 M 对应的地面点，而 A 为受到地物起伏影响后对地面点的定位结果。则由地物起伏带来的地面点定位误差为

$$\delta A = \frac{hD}{H-h} \quad (8.1.6)$$

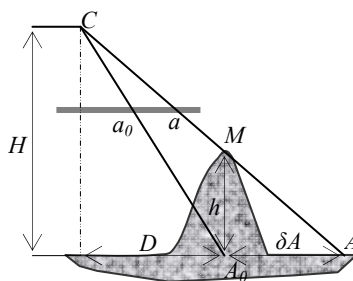


图8.1.3 地物起伏引起的像点偏移

可见，地物的起伏直接影响对地面点的定位精度。因而在任务规划时宜选择较为平坦的区域进行测速。

8.1.4 外场图像验证试验

我们实现了上述方法和算法的视觉自测速系统，达到每秒 50 帧处理速度。在实验室和外场图像试验中，应用该系统进行了飞行器自测速验证，与差分 GPS (DGPS) 比较，得到了实时性、可靠性和测速精度都满足工程要求的实验结果。该方法仅利用飞行器上常规装备的摄像机（可见光、红外摄像机或成像雷达等）、测高仪器（雷达高度表或激光测距仪等）和 INS，不需要额外增加载荷，通过匹配跟踪地面同名点在相邻两帧实时图中的位置，高精度实现了飞行器的自测速，具有很好的工程实用性。

8.2 基于序列图像与基准图匹配的飞行器定位测速测向方法

飞行器视觉导航根据应用对象条件、所提供的导航参数不同，可以有许多的方法。例如，上节介绍的基于序列图像匹配跟踪的飞行器自测速方法，仅利用飞行器上

的实时图像序列，加上原有的INS和高度计，通过匹配相邻时刻图像的同名点，可以测量飞行速度大小。但这种方法由于没有大地坐标位置和方向基准，不能提供飞行器位置、飞行方向等绝对量。

如果在飞行器上预先加装带有大地坐标的地面基准图，将机上实时图与基准图进行匹配，就可以得到导航需要的位置信息。这种技术由于基准图数据量大，图像匹配计算量大，实时性受到较大限制，同时还存在保障方面的困难。特别是与前述的序列图像前后图像匹配不同，实时图与基准图之间由于摄取的季节、气候、时辰等不同，进行可靠匹配存在较大困难。目前国际上仅在美国巡航弹等极少数国家级项目中得到有限的应用。

实时图与基准图景象匹配技术目前主要用于飞行器定位，未见国内外有用于测速测向的报道。我们提出基于生物视觉景象匹配的定位、测速、测向方法，能同时高精度测量飞行器的位置和飞行速度的大小、方向，并且运算速度快，能够实时地提供这些导航信息，扩展了景象匹配视觉导航的应用范围^[5]。该方法可为无人机等飞行器提供全程或定点的位置、速度、飞行方向等导航信息，或对机上惯导设备进行各级精度修正，尤其是在没有GPS可用情况下，能够克服长航时导航中惯导数据漂移问题，具有很好的应用前景。

8.2.1 基于景象匹配的定位、测速、测向原理

飞行器定位测速测向原理可以用图8.2.1说明。图中，实时图1和实时图2表示飞行器上的视觉传感器在时刻 t_1 和 t_2 对地面景象成的像，基准图是分辨率已知、图像坐标系和地理坐标系转换关系事先已精确标定的航片或卫片。基准图正北、正东方向定义如图。 P_1 、 P_2 表示实时图1和实时图2的图像中心点， P_1' 、 P_2' 表示 P_1 、 P_2 在基准图上对应的同名点。通过景象匹配得到实时图中心在基准图上的对应位置就完成了定位。若图像匹配精度为1个像素，则这样定位的精度与基准图和实时图两者中较差的地面分辨率相当，这通常远优于惯导的定位精度。

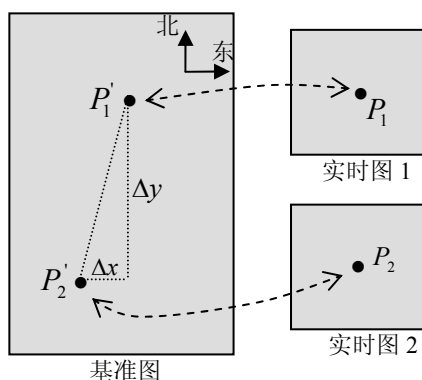


图8.2.1 基于景象匹配定位、测速、测向原理示意图

飞行速度、方向的计算是在定位的基础上进行的。设机载像机在时刻 t_i ($i=1, \dots, n$) 的实时图中心点 P_i 在基准图上对应的同名点 P'_i 的图像坐标为 (x'_i, y'_i) 。基准图图像分辨率为 d (m/pixel)。在一个较短的时间段内，飞行器近似做匀速直线飞行，通过两帧实时图与基准图的景象匹配就可以计算北向和东向速度，也就得到了速度的大小和方向。但是这样测量速度的精度完全依赖这两帧图像的匹配精度，测量精度不高且风险大。为此，我们采用全段图像序列多点实时景象匹配，多点拟合计算速度。

以北向速度分量求解为例，设飞行器北向位移分量表达式为 $y=at+b$ 。将各时刻实时图中心在基准图上的匹配结果代入匀速直线运动的北向位移分量表达式中，得

$$\begin{cases} y'_1 = at_1 + b \\ \vdots \\ y'_n = at_n + b \end{cases} \quad (8.2.1)$$

通过最小二乘法解线性方程组求解 a 、 b ，则北向速度分量 $v_N=d \cdot a$ (米/秒)。同理可计算东向速度分量 v_E 。飞行器的运动方向可表示为 v_N 与 v_E 的夹角：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v_E}{v_N}\right) \quad (8.2.2)$$

也可对各时刻实时图中心在基准图上的匹配位置数据进行5.7节的数据滤波处理，得到大地坐标系下的飞行轨迹和飞行速度。也可以用二次曲线等代替直线来描述飞行轨迹，并进行数据滤波计算飞行轨迹和飞行速度。

8.2.2 误差因素分析

在保证像机姿态与高度不变的条件下，图像匹配误差是上述视觉导航方法定位的唯一误差来源。如果图像匹配精度为1像素，基准图分辨率与实时图分辨率中较低的为 d (m/pixel)时，则定位精度为 d 米。而测速和测向精度与定位精度、数据点对应时间段长短、数据点数、数据处理算法直接相关（参见5.7节的内容）。通过数据拟合和平滑，可以显著提高测速测向精度。

当飞行器处于水平稳定飞行状态时，像机光轴保持恒定方向，实时图中心对应飞行器恒定方向的下视点，不会引入测速误差。但当像机姿态角发生变化时，实时图序列间图像中心点对应的下视方向不同，会给定位、测速、测向引入误差。通过机上惯导等提供的像机姿态信息，将像机光轴修正到同一方向，可以消除像机姿态角变化引入的误差。

如图8.2.2。C表示机载像机的光心位置， l_1 表示像机实际光轴方向， l_2 表示像机光轴

的设计方向， l_3 表示像平面， θ 为像机光轴偏离设计方向的角度， P'_1 表示实际图像主点， P'_2 表示像机光轴处于设计方向时的图像主点。通过将每一帧实时图像主点 P'_1 修正至 P'_2 ，并以 P'_2 作为实时图匹配中心与基准图进行景象匹配，即可消除像机姿态角偏差对定位测速测向精度的影响。修正公式为

$$\begin{cases} x' = x - F_x \tan \theta_1 \\ y' = y - F_y \tan \theta_2 \end{cases} \quad (8.2.3)$$

其中 F_x ， F_y 为像机等效焦距， θ_1 为飞机滚转角， θ_2 为飞机俯仰角， (x,y) 为 P'_1 的图像坐标， (x',y') 为 P'_2 的图像坐标。通常 θ_1 与 θ_2 由飞机上标配的惯导实时提供。而飞机偏航角不会引起像机光轴姿态的变化。

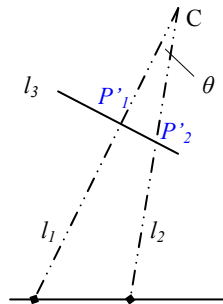


图8.2.2 像机光轴姿态偏差示意图

8.2.3 景象匹配策略

采用景象匹配导航的飞行器通常事先会规定飞行路线，但是由于误差因素的存在，飞行器不可能严格按照规定航线飞行，其真实飞行轨迹在规定航线附近的一定范围内分布。因此可在基准图上飞行器对应的航迹误差带内采用某种准则优选一些估计匹配正确率和精度会较高的区域(简称景象匹配区)。景象匹配区根据任务的不同有很多选取准则，常用的方法有：景象重复模式、相关峰峰值比、景象边缘密度、相关长度、独立像元数、灰度方差等^[6,7]。

景象匹配过程可分为首帧匹配和预测跟踪两部分。首先根据机载导航设备如惯导等提供的位置信息，确定飞行器飞至景象匹配区，根据机载导航设备提供的初值和误差大小，确定首帧搜索区域并进行匹配定位，通过上下文信息确定首帧匹配的正确性；继而转入预测跟踪模式，根据前一帧景象匹配结果，并利用机上导航设备提供的速度信息，预测下一帧位置和在预测点附近搜索区进行匹配定位。

实时图与基准图的匹配中，以实时图作为模板，在基准图搜索区域内进行匹配定位。由于拍摄时间和拍摄参数不同，实时图与基准图之间在光照、几何变形等方面会有一些

差异，最小二乘匹配或基于生物视觉的匹配算法具有更好的适应性。

8.2.4 外场图像验证试验

为了检验上述景象匹配定位、测速、测向方法，针对无人机外场试验的实时序列图像和该区域的卫片图像做了多组实验，并与机载DGPS的实测数据进行比对。以卫片图像作为基准图，机载实时图是下视可见光图像。摄像机姿态角变化误差在试验中已给予修正。景象内容主要为田野、村庄、河流、池塘等自然景物。实时图与基准图拍摄时间间隔较远，季节不同，图像间景象变化较大。实时图中，池塘、屋顶等部分区域的阳光反射比较严重，实时图与基准图间的灰度畸变较大。并且实时图拍摄过程中飞机高度、姿态有一定的变化。

首先对实时图和基准图进行景象匹配，得到实时图中心在基准图上的对应点，再根据其匹配定位结果解算飞行速度和方向，将计算结果和 DGPS 测量值对比，给出测速测向的精度。处理速度为 40 帧/秒，测速、测向精度满足工程应用要求。

我们通过对序列图像与卫片基准图像的匹配，实时、高精度地同时测量出飞行器的位置、速度大小和速度方向。大量实际图像实验表明，本方法定位、测速、测向的可靠性和精度高、实时性好，满足工程应用要求，并且对基准图与实时图之间的景象畸变、几何灰度变形等都有良好适应性，能适应相对复杂条件下的工程应用。

8.3 机载飞行器视觉着陆引导方法与技术

着陆是飞机飞行中的一个重要阶段，也是飞行安全的关键。着陆阶段是指从飞行高度处将飞机引导到着陆点处。着陆阶段对飞机引导设备具有很高的精度要求，因此，在航空技术的发展过程中，都对飞机着陆系统给予极大的重视。

根据着陆助降导航设备安装在飞行器上或是安装在地面，着陆导航方式分为机载和地基两种。其中机载视觉着陆引导技术通过机载摄像机拍摄地面景物序列图像并进行分析处理，寻找着陆地点，并测量飞机相对于着陆地点的位置、姿态、速度等运动参数，从而为飞机着陆提供引导信息。下面简要介绍其中涉及的几种方法和技术^[8]。

8.3.1 基于着陆参考标志测量飞机运动参数

机载视觉着陆引导的第一步是要寻找到着陆地点。对于预定的着陆地点，可以预先装订着陆地点场景的图像作为基准图，与机载像机拍摄的地面景象实时图进行匹配来确定着陆地点。景象匹配可以采用第五章介绍过的 SIFT 匹配、最小二乘相关匹配、基于生物视觉的匹配等多种匹配方法。而为了提高自主着陆导航测量的效率，常在预定着陆区

域内布置人工设计的着陆参考标志。通过识别和提取着陆参考标志来确定着陆地点和测量飞机的运动参数。这样可以大大提高着陆地点识别的可靠性、降低测量过程中图像处理方面的复杂度，提高测量系统的实时性和可靠性。这种基于参考标志的着陆引导模式在旋翼机中常用。

(1) 着陆参考标志的设计

图 8.3.1 是几种常见的着陆参考标志^[9~11]。着陆参考标志的设计一般应考虑下面一些因素。

1) 为了方便设置和不影响飞机着陆，一般应选用平面参考标志，直接设置在着陆平面上。如果算法需要，也可以在不影响飞机着陆的前提下选用立体的参考标志。

2) 着陆参考标志应满足飞机相对运动参数求解算法的需求。

3) 着陆参考标志应在复杂背景中具有较大的对比度，有利于增强识别的鲁棒性。

4) 在满足算法需求的前提下，着陆参考标志应尽量简单，易于快速识别定位，并节省在线处理的计算资源。

5) 参考标志应能在光照等变化条件下保持较稳定的成像性能。例如喷涂材料应选择回向反射（retro-reflected）材料或发光材料，有利于适应环境变化，从而提高全天候工作能力。

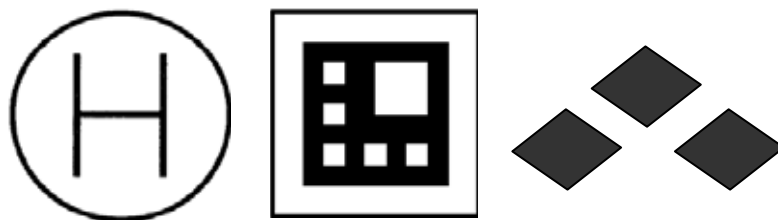


图 8.3.1 几种常见的着陆参考标志

(2) 基于相对对比度的高对比度区域自动检测算法

针对着陆参考标志图像通常具有较高的对比度，我们提出了一种基于相对对比度的高对比度区域自动检测算法^[12~14]，用于在图像中检测出可能包含着陆参考标志的高对比度区域。

定义图像 I 的绝对对比度为：

$$AC(I) = P_{i_{\max}} - P_{i_{\min}} \quad (8.3.1)$$

其中， P 为图像的直方图峰值所处的灰度值。绝对对比度就是图像的直方图的各峰值所对应的灰度值中的最大值和最小值之差。

进而定义图像 I 中的一块局部区域 R_k 的相对对比度为该区域的绝对对比度与全图绝对对比度的比值：

$$SC(R_k, I) = \frac{AC(R_k)}{AC(I)}, R_k \subseteq I \quad (8.3.2)$$

相对对比度可以用于表征图像中局部区域相对于全图的对比度特性，而不必关心该区域的形状，因此即使待识别标志的形状在图像上有形状上的变形，只要该区域具有较高的对比度，就可采用相对对比度作为识别条件。本算法可以高效地检测出图像中的高对比度区域，再进一步根据着陆参考标志的几何形状等特征对其进行识别确认和定位。

完成着陆参考标志的识别和提取后，就选用解算目标相对位置姿态参数和速度、加速度等参数的常用算法，或根据参考标志的特征设计专门算法，求解飞机的相对运动参数，用于着陆引导。

8.3.2 基于跑道特征测量飞机运动参数^[15,16]

跑道环境是固定翼飞行器最常见的着陆环境。相对于旋翼飞行器而言，固定翼飞行器的着陆速度快，并且视场范围变化急剧，仅依靠一种算法很难满足整个着陆过程中的导航测量需求。针对这种情况，我们在远距离时利用跑道消影点、跑道平面消影线特征，在近距离时利用跑道边缘线及跑道附近的参考点进行飞机相对运动参数的测量。这样，在远距离成像分辨率比较低时，只需要提取地平线（消影线）和跑道边缘线；在近距离成像分辨率比较高时，再提取更细致的图像特征。

(1) 基于跑道消影点及摄像机机下点计算除滚转角外的相对位置姿态参数

透视投影成像中，一簇不平行于图像平面的平行直线成像后相交于一点，这一交点就是消影点；平行于图像平面的平行直线成像后仍然平行，它们相交于图像的无穷远点。因而两条平行的跑道边缘线在图像上的交点就是跑道方向的消影点。消影点及后文的消影线是多视图几何中的两个重要概念，读者可参阅有关文献^[17]。

消影点对应的空间点位于无穷远处（平行直线相交于无穷远）。将跑道坐标系作为世界坐标系， X 轴沿跑道方向，如图 8.3.2。则消影点对应空间点满足 $X \gg Y, Z, T_x, T_y, T_z$ ，其中 (T_x, T_y, T_z) 为像机在跑道坐标系中的平移向量。根据这一关系，可以从中心投影成像关系得到：

$$\tan \kappa \approx -\frac{y - C_x}{x - C_y} \cdot \frac{F_x}{F_y} \quad (8.3.2)$$

其中 (x, y) 为跑道边缘消影点的图像坐标， κ 为像机的偏航角。

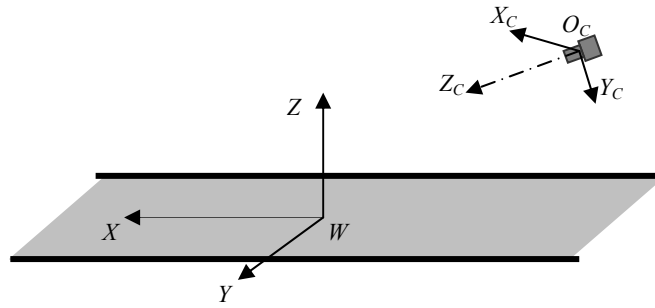


图 8.3.2 跑道坐标系和像机坐标系

得到偏航角后，将图像校正到偏航角为 0 的状态。本算法中要求滚转角已知。再根据已知的滚转角将图像校正到滚转角为 0 的状态。摄像机机下点指摄像机光心在跑道平面 $O-XY$ 上的投影点，如图 8.3.3。

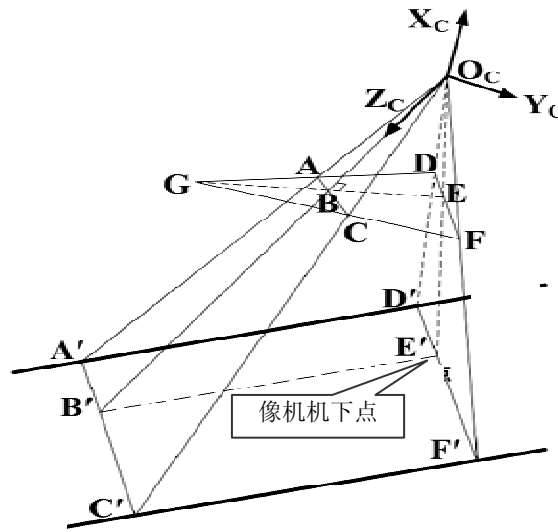


图 8.3.3 摄像机机下点及跑道边缘的透视成像关系

图 8.3.3 中, E' 为摄像机机下点, E 为 E' 的像点, 像机光心为 O_C , 像机在跑道坐标系内的高度为 h ; $A'D'$ 和 $C'F'$ 是跑道的两条边缘, 跑道宽度为 w ; AD 和 CF 是跑道边缘的像, 点 G 即为消影点; 点 B 是图像中心, 等效焦距为 $F_x=F_y=f$ 。

由于偏航角和滚转角都已修正到 0, 可以根据透视成像关系得到像机的俯仰角为

$$\omega = \arctan\left(f / \overline{GB}\right) \quad (8.3.3)$$

像机高度为

$$h = fw \cos \omega / \overline{AC} \quad (8.3.4)$$

像机位置在水平方向偏离跑道中心线距离为

$$t_Y = \frac{w(\overline{AB} - \overline{BC})}{2\overline{AC}} \quad (8.3.5)$$

而像机沿跑道方向的位置分量可以直接取为 0, 相当于将跑道坐标系的原点建立在像机机下点。

(2) 基于跑道平面消影线近似计算滚转角

与平行直线相交于无穷远点(消影点)类似, 空间平行平面相交于无穷远处的消影线^[17]。跑道平面的消影线就是图像中的地平线。根据消影线可以近似求解基于跑道消影点及摄像机机下点算法中无法求解的像机滚转角。

由于消影线对应的空间直线位于无穷远处, 则该空间直线上任意点坐标满足 $X, Y \gg Z, T_x, T_y, T_z$ 。根据这一关系, 并且首先根据消影点计算像机的偏航角并将图像校正到偏航角为 0 的状态, 则可以从中心投影成像关系得到像机的滚转角近似为

$$\varphi \approx \arctan k \quad (8.3.5)$$

其中 k 为消影线的斜率。

(3) 基于跑道边缘及跑道附近的参考点计算相对位置姿态

本方法实际上是从控制点计算位置姿态参数和从控制直线计算位置姿态参数的结合, 将点的成像关系和直线的成像关系联立, 求解相对位置姿态参数。由于跑道的宽度和方向已知, 跑道的两条边缘就是两条控制直线。再在跑道附近设置或选取几个位置已知的参考点作为控制点, 如信号灯、塔台等。联立各控制点和控制线所满足的成像关系式, 组成关于像机相对于跑道的外参数(相对位置和相对姿态)的方程组。当跑道边缘以及参考点的数目和布局满足使方程组可解的条件时, 就可以求解像机的相对外参数。再根据像机在飞机上的安装参数计算飞机相对于跑道的位置姿态参数。

8.3.3 基于局部平面诱导单应寻找平坦区域

对于没有预定着陆地点或事先对着陆地点的情况并不了解的情况, 比如月球探测器在月面着陆, 无人直升机在未知区域着陆等, 需要在视觉着陆引导中首先寻找适合着陆的区域, 或者判断预定着陆地点是否适合着陆。判断是否适合着陆的一个重要准则就是该区域是否平坦。基于平面诱导单应的原理可以计算区域平整度, 指导选择着陆地点。

用机载像机对地面同一区域先后拍摄两幅图像, 提取每幅图像上的大量特征点, 并匹配两幅图像间的同名特征点。如果地面上的若干特征点处于同一平面内, 则存在单应矩阵 \mathbf{H} , 使得所有这些共面特征点分别在两幅图像中的像点 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}' 之间满足

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (8.3.6)$$

这就是由该空间平面所诱导的两幅图像中对应点的单应关系（平面诱导单应）^[17]。它意味着如果共面特征点 $\mathbf{x}_1 \sim \mathbf{x}_n$ 所在的平面诱导单应应为 \mathbf{H} ，而特征点 \mathbf{x}_{n+1} 也满足式(8.3.6)，则 \mathbf{x}_{n+1} 也在 $\mathbf{x}_1 \sim \mathbf{x}_n$ 所在的平面上。

具体应用上述原理时，首先提取和匹配两幅图像中的同名特征点，然后对于对应点集之中所有的非共线 3 点组合，计算由这 3 点确定的局部平面所诱导的单应。当其中某两个相邻局部平面的诱导单应之间的差别小于给定阈值时，就认为所对应的两组特征点在同一个平面内，对其进行归并。将所有相邻且共面的局部平面进行归并后，就得到了对场景的平面分割结果，可以作为着陆地点的预选结果。

8.4 地基飞行器视觉着陆引导方法与技术

地基助降导航系统通过在着陆点附近地面安置测量设备，在飞机进近着陆过程中测量飞机的运动参数，为飞机着陆提供引导信息。它也称为地基着陆引导系统。现有的地基助降导航系统主要有：仪表着陆系统(ILS)，微波着陆系统(MIS)，精密进近雷达(PAR)，卫星导航系统等^[18-20]。ILS造价低廉、系统维护方便，但是单独的ILS在指示精度上还不能达到高自动化进场着陆精度要求。MIS的性能好，但造价和维护成本太高。PAR具有较高精度，但在近场的使用效果不好，并且容易被干扰和打击。GPS等卫星导航系统易受干扰，使用受到限制和约束。

我们提出建立地基摄像测量平台，用摄像测量方法实时测量飞机与跑道的相对位置、姿态和速度，计算出飞行轨迹与预计下滑道的偏差，引导飞机着陆的方法和技术。这种地基摄像测量系统可望成为与上述传统助降引导方法并列的、新型体制的飞机助降引导手段。基于摄像测量的引导技术具有简单、方便、自成体系、被动测量、不受外界干扰、成本低等优势，可对整个视场中的目标运动参数进行动态测量。在实际外场飞行实验中，实测结果与机载DGPS相比，二者的偏差在20cm左右（1km测量区域内）。实测结果表明该飞行器导航系统满足飞机着陆引导的需求，是一种很有前途的新型助降导航手段。

8.4.1 测量系统总体设计

我们设计的测量系统能够完成从3km~5km远处直至着陆点的飞行轨迹测量。由于测量物距变化范围大，单台固定焦距的摄像机无法全程满足视场、景深等需要。使用带变焦镜头的经纬仪是一个可能的选择，但它有成本高、系统可靠性降低等弱点。因此，我们提出采用了多台摄像机分区域接力测量的方案。例如该引导系统由六台摄像机和配套计算机组成，其布置如图8.4.1。在飞机跑道两侧各安装一套三台摄像机系统，三组摄像

机分别称为远场、中场和近场摄像机，分段采集不同区域的图像。三组摄像机均采用固定焦距等待式拍摄方式。设计每相邻两组摄像机视场有一定重叠区域，保证它们的视场无缝连接，并覆盖整个飞机着陆区域，使飞机在整个着陆引导过程中都处在至少一对摄像机的交会视场中。

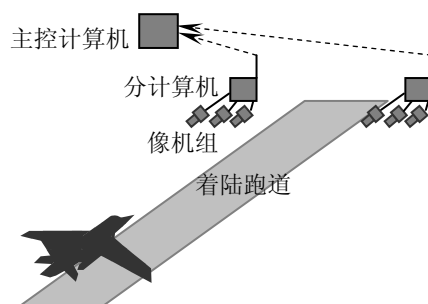


图8.4.1 飞机着陆地基视觉引导系统

本系统测量飞机着陆轨迹、速度参数的过程是：任务开始后，每侧三台摄像机开始采图。先处理远场摄像机的图像并检测飞机是否进入视场。检测到目标后，系统进入目标跟踪锁定，并在图像上对飞机上的着陆灯等特征点进行亚像素精度定位。主控计算机接收飞机特征点定位结果，三维交会计算飞机轨迹和速度。随着飞机逐渐飞近，依次切换到在中场和近场摄像机图像中检测目标和计算运动参数。

8.4.2 摄像系统标定

为了对飞机进行三维交会测量，必须对跑道两侧的摄像机组在同一坐标系下进行高精度标定。我们在摄像机的视场内竖立多根标杆，每根标杆上设置若干个参考标志点。这些标志点的位置坐标以及摄像机的安装位置由DGPS或全站仪进行精确测量。这样就得到了若干控制点，并得到了像机安装位置的标定结果。用摄像机拍摄这些参考标志点的图像，并提取各个参考标志点。标定计算中，首先将主点取在图像中心，仅计算光轴姿态和等效焦距，然后将这些结果作为初值，通过光束法平差计算像机参数的精确结果。

为了验证摄像机系统标定的精度，除了标定参考点外，再在视场内设立一些验证点，并由DGPS或全站仪精确测量这些验证点的位置坐标。利用像机参数标定结果交会测量这些验证点的位置，并与DGPS或全站仪测量结果进行比对。实际验证实验中，交会测点结果在跑道方向误差小于15cm，其它方向误差小于5cm，满足着陆引导的精度要求。

8.4.3 目标自动识别跟踪与定位

对目标的自动检测和跟踪锁定，尤其是高精度定位，是本方法的关键核心技术之一。为了高效、可靠地自动识别、跟踪和高精度定位目标，我们选择飞机上的翼灯和着陆灯

作为特征标志。为了更好地适应不同的天时和天候，可以采用红外、近红外成像，增强系统的稳定性和抗干扰能力。

经过研究和实验比较，我们采用NLOG(Negative LOG)算子^[21,22]来提取特征标志。NLOG算子具有去直流分量效应，并且具有良好的抗噪性。我们基于NLOG算子的算法可靠、稳定地实现了对特征标志的实时识别、跟踪和高精度定位。实验中，特征标志定位精度达到0.1像素。

8.4.4 飞机着陆轨迹测量现场试验及结论

为了验证本方法和系统的工程应用性能，我们进行了实际外场飞机着陆轨迹现场实时测量试验。试验中，采图频率和测量结果数据率为25帧/秒。图8.4.2为两帧试验图像及飞机标志灯检测结果。为了分析实验测量结果，飞机上装备了DGPS设备，并记录飞机姿态。结合飞机结构尺寸和DGPS安装位置计算出飞机标志灯在每一时刻的三维位置，用于与视觉测量引导的结果比对。



图 8.4.2 试验图像及飞机标志灯检测结果

试验结果表明，在整个测量区域内，视觉引导测量得到的轨迹与DGPS给出的目标轨迹很好地吻合。在距离着陆点1km以内范围，摄像测量得到的三维位置数据与机载DGPS给出的三维位置数据间的偏差约为20cm，满足着陆引导的要求。

图8.4.4为某一次着陆过程中本系统测量得到的标志灯轨迹曲线以及机载DGPS给出的结果，其中沿跑道的距离方向为X，与跑道垂直的水平方向为Y，高度方向为Z。实线轨迹为摄像测量结果，虚线轨迹为DGPS结果。在整个测量区域内，两组轨迹曲线几乎重合。试验结果表明：基于摄像测量的飞机着陆轨迹实时测量方法是可行的，简易系统的测量精度即可达到20厘米量级；采用多摄像机区域接力测量的方式使得系统的可靠性和精度高、成本低，并有效地扩大了系统的测量区域；飞机上的着陆灯是非常好的合作标志；系统实现了25帧/秒的处理速度，具有良好的实时性能。

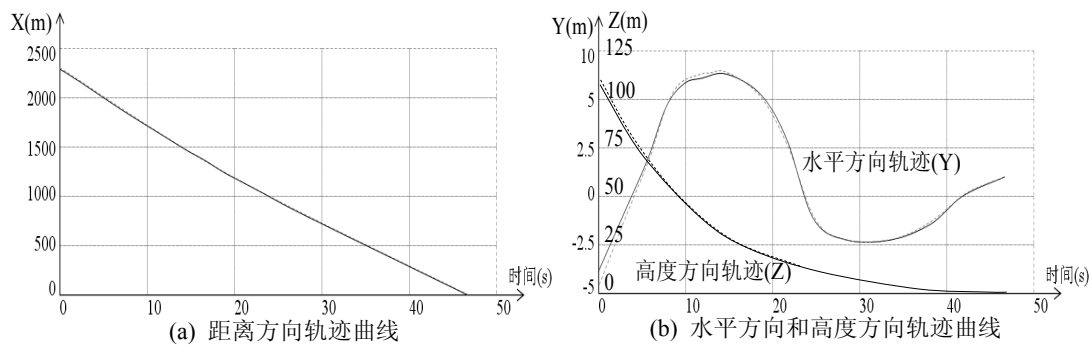


图8.4.4 飞机着陆轨迹摄像测量结果与DGPS数据比较

我们提出和实现的基于摄像测量的实时测量飞机着陆轨迹速度的飞机着陆引导方法和系统，提供了一种不同于雷达、GPS 等传统方法的、新体制的飞机着陆引导手段。该方法和技术具有自成体系、不易受干扰和低成本、小型机动等特点。除了可为正常机场的飞机着陆提供引导信息外，更是为无人机等在临时着陆场的着陆引导提供了方便、灵活、实用的方法和手段。

8.5 基于机载序列图像三维地形重建的地形匹配定位导航方法

图像匹配是飞行器视觉导航中最主要的手段之一，其基础是地表特征与地理位置之间的对应关系，可以分为景象匹配导航与地形匹配导航两种方式。景象匹配导航以区域地貌为特征，采用成像装置对目标区域附近的景象成像并与基准景象图像匹配进行导航，精度较高。前面 8.2 节中基于序列图像与基准图匹配的飞行器定位测速测向方法就是典型的景象匹配导航。

地形匹配导航是利用地形高度特征进行匹配，目前大多采用雷达或激光测距仪测量飞行经过地区的三维地形图，并与基准地形图进行匹配提供定位、导航信息。由于地面景象受季节、气候、基准图的拍摄时间等因素影响较大，降低了景象匹配的可靠性。而地面的三维地形特征则相对稳定不变，因而地形匹配可以给出更加可靠的导航信息^[23]。但由于雷达或激光高度计等传感器属于主动测量装置，容易被发现和攻击，重量、体积以及能耗都比较大，激光扫描还需要机械摆动装置，而且，这些主动探测设备所生成的实时地形图测量点间距较大，数据较少^[24,25]。这些弱点大大限制了雷达或激光测距仪用于地形匹配方法进行定位导航的实际应用。

基于被动光学成像进行地形测量的地形匹配导航在国际上已开始研究。这类导航方法多用于无人机的自主飞行中，例如应用光流方法估计场景深度，用于路线规划和避障等^[26,27]。基于光流方法需要已知飞行器的精确飞行速度，计算量大。从序列图像重建三

维地形的方法是另一个研究热点。T. Templeton 等人研究了平面平行透视原理重建三维地形，用于地形图绘制和无人机导航^[28,29]。A. Johnson 等人研究了地形重建在无人机着陆地点选择方面的应用，其方法需要已知像机在各次成像之间的相对位置与姿态^[30]。M.R. Stevens 等人研究了重建三维地形与基准数字地面模型（DTM）进行地形匹配确定飞行器位置、姿态导航信息的方法^[31]，该方法需要已知飞行器的飞行速度，在线飞行时需要重建较大区域的实时地形图，耗时较大，难以满足实时处理的应用要求。而在国内尚未见到用被动视觉图像重建三维地形图与基准地形图匹配进行导航的研究报道。

我们提出了一种从飞行器机载序列成像重建三维地形用于地形匹配的视觉导航方法。利用序列成像的特点，提出采用少量特征点跟踪与关键帧图像三维解算相结合的序列图像分析方法，可以实时重建得到航迹区域的三维地形，直接作为实时地形图与基准地形图匹配，提供定位导航信息。

本节主要介绍机载序列图像三维地形重建在地形匹配导航中应用的原理和主要过程，而对所涉及的三维重建具体算法，可参阅第七章或其它相关文献。

8.5.1 基于机载图像三维地形重建的地形匹配导航原理

本方法利用飞行器已有的或者加装的可见光或红外光成像传感器，在飞行过程中对航迹下方的地形地貌连续成像，从具有重叠区域的序列图像中重建三维地形，获取航迹的实时地形图。将重建的实时地形图与机载基准地形图进行匹配确定实时地形图对应的实际位置，从而提供导航信息。

我们将序列图像中对相同场景具有良好交会角度条件的、并选定用于三维地形交会的图像帧定义为关键帧图像，用于三维解算。关键帧图像上同名特征点的可靠、高精度匹配是进行三维重建的关键。而且，对于飞行器视觉导航应用，特征点的匹配必须实时、全自动完成。

在进行同名特征点匹配时，如果直接对具有较大交会角度的图像进行特征点匹配，由于地形匹配中的场景通常具有较大的立体效应，由于成像角度差别大，图像同名特征点的几何与强度特征变化都较大，使匹配的可靠性和精度降低，搜索时间增加。考虑到机载序列图像是在飞行过程中连续拍摄得到的，其在时间上的连续性和成像区域上的重叠性使得相邻图像间成像角度、图像特征变化、同名特征点的视差都较小，容易实现自动跟踪与配准，可以为最终的关键帧图像特征点匹配提供可靠的结果。同时，以这些跟踪点作为关键帧的跟踪控制点，可为关键帧间特征点匹配提供约束，保证匹配的可靠性和实时性。

基于以上分析，我们提出了对少量特征点进行跟踪配准，以此跟踪点作为控制点引导关键帧特征点匹配的序列图像分析策略，即保证了地形三维重建中点匹配的可靠性，也提高了计算实时性。定位导航系统的工作流程如图 8.5.1 所示，分为序列图像三维地形重建和地形匹配两个主要部分。

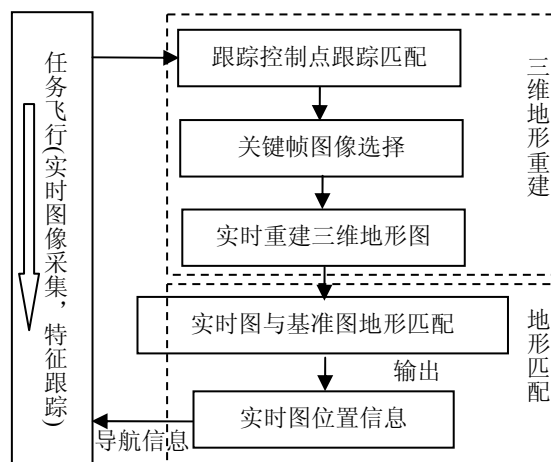


图 8.5.1 基于时序图像三维重建的地形匹配导航系统工作流程

下面针对具有序列图像关键帧拍摄时刻粗略的像机姿态（惯导提供）和拍摄点之间相对距离信息（根据飞行速度得到）的条件，重建得到与基准地形图尺度和方位分布一致的地形图数据进行匹配。地形数据的匹配有多种较成熟的算法，可根据实际情况选用，为不失一般性，我们采用了经典的互相关(COR)算法实现地形匹配定位^[23]。在关键帧图像相对位置与姿态信息不完全的情况下，重建得到的三维地形图与实际的三维结构存在相似变换关系，常规地形匹配算法将不可用，需要针对这种重建结果研究多维地形匹配的问题。

8.5.2 基于机载时序图像的三维地形重建方法

从飞行器航迹的对地面序列成像中，通过三维重建获取实时地形图的方法涉及图像特征跟踪、序列图像关键帧选取、关键帧图像特征点提取匹配、三维解算等内容，是基于序列图像地形匹配导航的关键环节。

在导航应用中，地形三维重建要在飞行器的飞行过程中实时完成，同时要保证重建的特征点足够多，满足地形匹配的需要。因此，我们仅对关键帧图像进行三维解算。根据序列图像重叠度大的特点，对少量特征点在全部分列图像中进行跟踪，可以得到可靠和高精度的特征点匹配结果，从而为关键帧图像的特征匹配提供辅助的匹配控制点和约束条件。利用序列图像在不同成像点位置对相同场景的良好交会角条件确定关键帧图像。

根据实际需求,对关键帧图像中的航带特定区域进行特征匹配和三维解算,引入关键帧图像之间像机的相对距离和姿态参数,可以将三维重建数据转换为局部坐标系下各地面点 (x',y') 的高程数据 $h(x',y')$,直接用于地形匹配。如果单次解算的航带长度不满足地形匹配的需求,则将多个关键帧重建三维地形拼接后用于地形匹配。

(1) 关键帧选择

关键帧是序列图像中参与地形三维解算的图像,需要具有足够的重叠区域,同时对相同场景的视角关系要满足交会条件。

针对飞行器飞行速度和飞行高度粗略已知的条件,为达到交会角的要求,可以根据像机位置之间的距离来确定关键帧。假设上一关键帧图像为第 f 帧,根据飞行器的速度计算当前第 k 帧图像与第 f 帧成像时刻间的像机距离 d_{fk} ,如果 d_{fk} 大于某一阈值则选为关键帧,否则继续判断下一帧图像。在关键帧的选择过程中对较少的控制特征点进行包括非关键帧在内的全序列跟踪,为关键帧图像的特征点匹配提供控制引导信息,这些特征点就是跟踪控制点。

理论和实验表明,阈值大小对序列图像处理的计算时间影响较小,而对重建的精度影响较大。阈值较小则重建的交会条件变差,而阈值较大时重建的交会条件较好,但是匹配点数则变少。因此需要在满足交会条件的基础上选择较小阈值,得到较多匹配同名点用于三维解算。对选择的关键帧图像,通过特征点自动提取匹配、三维解算等步骤进行三维地形重建。

(2) 关键帧图像特征提取与匹配

1) 稀疏特征点提取与匹配

关键帧稀疏特征点的提取与匹配是图像间相对几何关系解算的前提。为了保证解算的准确性,需要在全图较均匀地选择较多特征点并完成自动的精确匹配。这里采用Forstner算法进行稀疏特征点提取^[4],用全序列的跟踪控制点提供的已配准信息辅助实现初步匹配,再用最小二乘匹配实现精确匹配,保证了较高的匹配速度和精度。

在全序列图像确定关键帧的同时完成了关键帧之间 n 个跟踪控制点的跟踪,由于序列图像之间的高重叠度,同时在跟踪过程中设定较高的跟踪确认阈值,可以保证这些特征点的跟踪准确性。

对于飞行器距离地面较远的这种成像条件,在误差允许范围内可以用8.3.3节介绍的单应矩阵 \mathbf{H} 来描述两幅图像对应点之间的关系。地面同名点分别在两幅图像中的像点 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}' 之间满足式(8.3.6),即 $\mathbf{x}'=\mathbf{H}\mathbf{x}$ 。可以根据已跟踪的控制点求解单应矩阵^[17],再利用单

应关系预测第一关键帧的待匹配点 x 在第二帧图像中的粗略匹配位置，再在粗略位置附近利用 5.3.2 节介绍的最小二乘匹配算法进行匹配定位，获得高精度匹配结果，同时剔除初匹配中的误匹配点。

2) 航带区域图像密集点匹配

上述的跟踪控制点是通过对逐幅图的匹配跟踪得到的，如果点数太多，会影响实时跟踪计算的速度，并且用于图像之间相对几何关系解算的特征点也不需要太多。因此自动提取、匹配的这些控制点是稀疏特征点，它们在全图分布较广但比较稀疏，通常不满足地形轮廓匹配的要求。

对地形匹配而言，需要根据实际的要求对航带方向的较多密集点进行重建。这些点的匹配在关键帧的相对几何关系解算完成之后进行，此时已经确定了航带方向，同时利用图像之间的对极几何关系，综合运用对极约束和单应约束可以快速准确完成匹配^[17]，匹配的搜索范围根据已配准的特征点的视差确定。具体原理可以参见第七章的有关内容。

(3) 飞行航迹的三维地形重建

三维地形重建的算法有许多种，这里采用第七章介绍的双视图的方法对关键帧图像进行重建。即首先从全图稀疏匹配特征点求解两图像间的基础矩阵，然后引入像机内参数分解出两次成像之间像机的相对运动，从而组成两个状态下成像的投影矩阵，最后对航带密集匹配点通过三角交会实现三维重建，并根据关键帧的高程数据和像机姿态参数得到水平面局部坐标系中的各地面点 (x', y') 的高程数据 $h_t(x', y')$ 。

为实现鲁棒性和高精度的相对几何关系求解，在求解基础矩阵时，采用加权和 RANSAC 联合的算法。即用 RANSAC 算法多次在稀疏匹配点组中随机选择 8 点解算基础矩阵，根据点集的支持度来确定最优的基础矩阵。解算过程中还根据特征点匹配结果的准确度信息对其进行加权，进一步提高解算精度。

在像对间相对运动的解算中，得到旋转矩阵和平移向量后，采用光束法平差等算法对结果进行优化，解决两视图运动分析对噪声敏感的问题。

8.5.3 地形匹配方法与实现

航迹地形的实时三维重建结果 $h_t(x', y')$ 可直接与基准地形图进行匹配，提供导航定位信息。基准地形图是航迹区域各地面点地形高度 h_m 关于其绝对位置 (x, y) 的函数 $h_m(x, y)$ ，以离散点的形式存储。

这里利用归一化互相关（即第四章介绍的标准化协方差相关）方法进行匹配，在基准地形图初始位置附近各点计算其与实时地形图的相关系数，将相关系数做二次拟合进

行精确定位。在实时地形图上匹配模板取为沿航迹方向长 L 个数据点，宽 W 个数据点。在 (x,y) 位置的相关系数计算公式为：

$$J_{COR}(x,y) = \frac{\sum_{(i,j) \in LW} [h_t(i,j) - \bar{h}_t][h_m(i,j) - \bar{h}_m]}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in LW} [h_t(i,j) - \bar{h}_t]^2 \sum_{(i,j) \in LW} [h_m(i,j) - \bar{h}_m]^2}} \quad (8.5.1)$$

式中 LW 表示模板区域， $h_t(i,j)$ 和 $h_m(i,j)$ 分别为实时地形图和基准地形图相对应的模板区域内 (i,j) 位置的地形高程数据， \bar{h}_t 和 \bar{h}_m 分别为两地形图模板区域的地形高程均值。根据机载惯性导航系统的误差范围确定匹配搜索区域。为了克服航带初始方向参数的误差，将实时图在一个较小的角度范围内进行旋转，重新滑动匹配确定相关系数极大值位置。

基于上述基本原理和关键技术，利用时序图像三维重建进行地形匹配导航的方法可以通过以下流程实现：

跟踪控制点跟踪 → 成像间距评估 → 关键帧选择 → 特征提取匹配 → 相对几何关系解算 → 航带区域密集点匹配 → 引入序列图像成像间相对距离参数，密集点三维交会重建 → 引入姿态参数，计算实时图的局部地形数据 → 实时图模板区域与基准图匹配定位。

8.5.4 实验验证和分析

(1) 沙盘序列图像三维地形重建与匹配定位实验

手持像机对地形沙盘拍摄序列图像，重建条带区域的三维地形，将重建地形与沙盘地形数据进行匹配定位。处理过程包括特征点的自动选取、跟踪匹配、关键帧图像选择、三维重建、变换校正、地形匹配等步骤。

图 8.5.2(a)和(b)为对实验序列图像进行解算的多组关键帧图像中的一组及跟踪控制点提取匹配结果，(c)为(a)中条框所示的航迹条带区域的三维重建结果。重建地形图与沙盘基准地形图匹配的相关系数分布如图 8.5.2(d)，其匹配相关系数极值在 0.5 左右，相关系数分布较尖锐，具有较好的定位性能。多次实验表明，对于地形起伏幅度为 Δh ，成像距离约为 $10\Delta h$ 的情况，重建点通过地形匹配进行定位，其位置误差的方差在 $0.1\Delta h$ 以内。在配置为 1G 内存，3.0G 主频的计算机上进行处理，对少于 20 个跟踪控制点的跟踪，处理速度优于 15fps，对于关键帧图像 100 个特征点的匹配、重建以及地形匹配可以在 300ms 内完成。对于在 300m 左右高度，以亚音速飞行的无人机，将本算法用 DSP 或 FPGA 芯片实现能满足实时性要求。

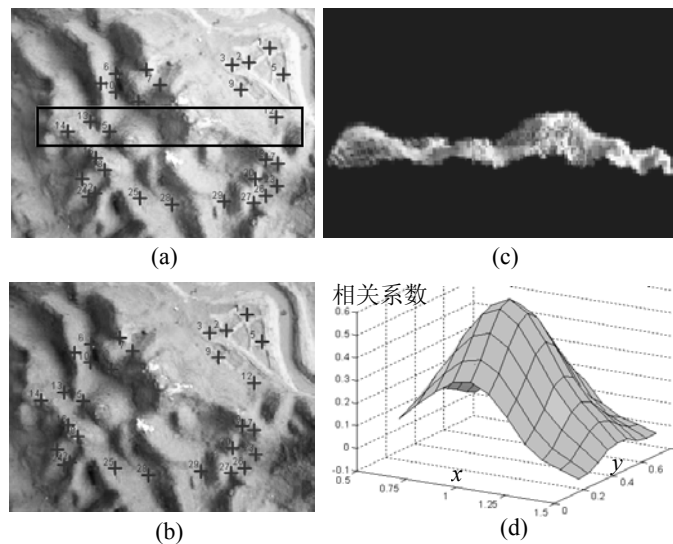


图 8.5.2 沙盘序列图像三维地形重建与匹配结果

(2) 无人机航拍图像三维地形重建与匹配定位实验

对实际的无人机航拍图像进行离线分析实验。实验中选取区域的地形为丘陵区 and 山丘区。图 8.5.3(a)、(b)、(c)分别给出了一组丘陵区序列图像中的一对关键帧，及(a)中条框所示局部条带地形重建结果，该实验中像机以固定角度前下视对地面成像。无人机飞行速度较慢，成像空间分辨率约为 0.3m。根据飞行器的速度信息估计关键帧图像间的基线长度，从而得到与基准地形相同尺度的三维地形，将其与基准地形图匹配实现定位，重建地形的定位精度到达米级。

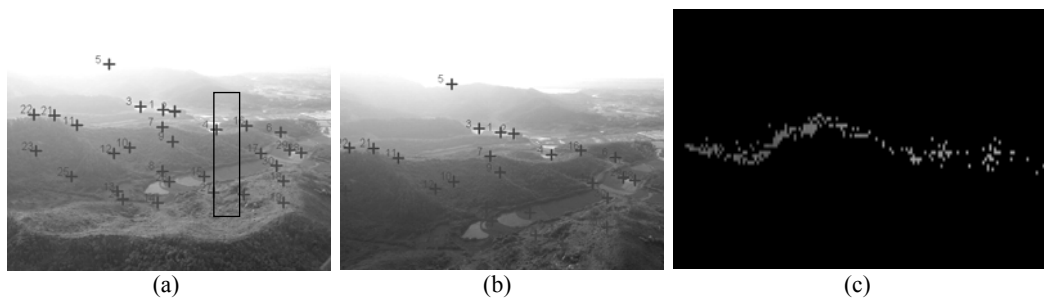


图 8.5.3 无人机航拍图像三维地形重建结果

由于平原区不具备地形起伏特征与地理位置的对应关系，因而不能采用基于地形匹配的定位导航。在处理过程中，我们采用 8.3 节基于单应的约束条件检测平面地形，仅在地形具有明显起伏的区域进行地形重建和匹配定位。对于平原区域可以采用前面景象匹配定位的方式实现飞行器视觉导航。

我们提出了通过机载摄像机对地序列成像进行三维地形重建，利用重建的实时地形

图进行地形匹配的飞行器视觉导航方法。相对于传统的用主动、有源地形测量的地形匹配技术，该方法自成体系，具有功耗、体积、重量小，成本低、精度高的特点，并且采用被动成像方式，能大大提高飞行器的隐蔽性能和生存能力，具有较大优势。当飞行器具有景象匹配导航模式时，可以直接利用景象匹配的成像像机，不增加额外负担。

在该方法的实现过程中，我们提出了对少量特征点进行跟踪匹配，并以此作为控制点对关键帧密集特征点匹配的方法，同时提高了方法的可靠性和实时性。利用对地序列成像三维地形重建可以得到较多的实时地形图数据点，地形匹配定位精度高。在实际应用中，通过对算法的优化和采用高性能处理器可以保证算法的实时性，满足飞行导航的条件，具有良好的工程实用性。

8.6 航天器自主交会对接视觉引导方法与技术

在空间舱交会对接等任务中，需要实时测量追踪器与目标器这两个航天器之间的相对运动参数，为对接控制提供引导信息。当两个航天器交会相距一两百米到1米以内时称为近距离段。在近距离段，基于图像测量目标的相对运动参数是目前国际、国内应用和研究最多的方式^[32~35]。

我们长期对航天器自主交会对接中的两航天器间相对运动参数的视觉测量技术进行研究。下面简要介绍一种自主交会对接视觉引导系统的总体方案和技术。并针对空间恶劣环境会对地面标定好的摄像测量系统参数产生扰动，从而影响测量精度的问题，我们提出可有效消除上述扰动影响的对测量系统参数进行在轨标定的两种方法。

8.6.1 航天器自主交会对接视觉引导总体方案

航天器自主交会对接的相对运动参数视觉测量中，在追踪器上安装像机，在目标器上布置合作标志。摄像测量系统参数和目标标志点在目标器上的位置在地面进行标定。摄像测量系统参数包括像机内参数、像差和在追踪器坐标系中的外参数。在近距离段交会对接过程中，实时测量目标器与追踪器间的相对运动参数，即相对距离和姿态。

(1) 远、近场划分和像机、合作标志配置

交会对接过程中物距由远及近变化较大，由于像机景深限制、观测精度要求等原因，一般难以只由一组像机和标志点完成全过程的测量。因而通常将目标器与追踪器的接近过程划分为远场和近场两个阶段。例如某视频导航系统在目标器距离追踪器 100 米到 1 米的接近过程中采用视觉引导，并将两航天器相距 100 米到 10 米划为远场，相距 10 米到 1 米划为近场。

配置两组像机和标志点，分别用于远场和近场时测量目标器的相对运动参数。一种远、近场像机和合作标志的配置方案如图 8.6.1。其中远、近场合作标志各 4 个，远、近场像机各配置两台，用于在远场和近场阶段双目或单目测量目标运动参数。

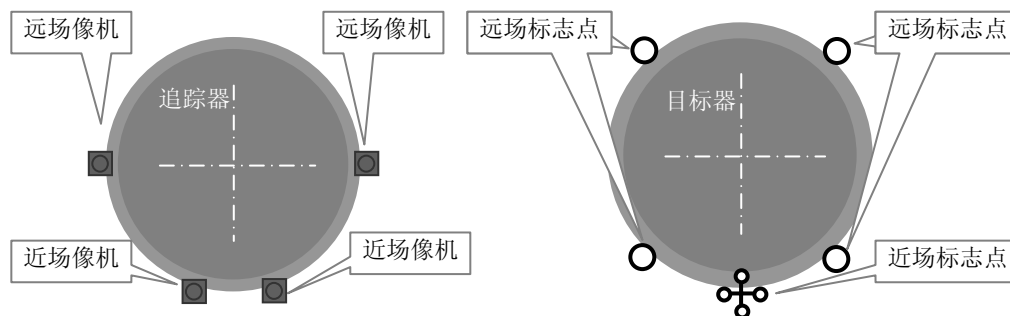


图 8.6.1 自主交会对接视觉引导像机和合作标志配置

像机和合作标志的配置需考虑景深范围、图像分辨率、有效视场范围、基线长度、基高比等。其中基线长度是用于双目交会测量的两台像机之间的距离，基高比是基线长度与物距之比。有效视场和景深范围应满足测量范围和物距的要求。图像分辨率越高对提高特征点提取精度越有利，但同时会提高对硬件资源和图像处理效率的要求。而对于双目交会求解，基高比与双目交会精度关系密切。

(2) 目标器相对运动参数测量过程

当上一级观测系统测量到目标器相对追踪器距离已达到 150 米时，光学成像测量系统的远场像机开始工作，实时测量目标器的相对运动参数。当远场像机测量到目标器相对距离已达到 20 米时，近场像机开始工作，实时测量目标器的相对运动参数。

采集到当前时刻图像后，首先对目标合作标志进行识别和提取，提取结果作为解算目标位置姿态参数的输入值。根据目标特征点提取结果，判断是否满足求解需要。如果目标特征点提取结果满足单目或双目求解需要，则先求解目标位置姿态初值，再基于光束法平差求解目标位置姿态参数的精确值。可以根据当前时刻合作标志提取结果，线性求解目标位置姿态参数作为平差初值。也可通过先前时刻的测量结果来预测当前时刻目标位置姿态参数，作为平差初值。得到位置姿态测量数据后，对测量数据进行平滑滤波，进一步得到速度、加速度结果。

上述目标提取与目标体运动参数解算的有关方法可以参见本书有关各章节。

(3) 故障工作模式设计

本方案采用了冗余设计，考虑了下述可能出现的故障模式。

1) 标志灯故障

当远场或近场的四个标志灯中有一个发生故障时，通过三个标志灯仍可正常求解目标运动参数。当两个以上标志灯发生故障时，不能测量目标器姿态，但仍可双目交会测量目标器的位置。

2) 像机故障

当双像机中有一个发生故障时，另一正常工作的像机仍可进行单目测量。

3) 目标器相对运动超出预计范围

当目标器在双像机的公共视场中时，进行双目测量。当目标器仅在其中一台像机的视场中时，进行单目测量。

8.6.2 消除测量系统参数扰动影响的在轨标定方法

由于空间环境恶劣，例如航天器发射时振动冲击影响、空间重力差、巨大温差影响等，会对地面标定好的摄像测量系统参数产生不可忽略的扰动，从而严重影响测量结果。我们对抗扰动测量目标位置姿态进行了研究，提出了下述使用固连修正像机对测量像机外参数进行实时修正，和基于光束法平差有选择地实时修正摄像测量系统参数的两种在轨标定的方法。从而在测量系统参数受扰动的情况下，有效消除扰动影响，得到目标位置姿态的高精度测量结果^[36]。

(1) 固连修正像机实时修正测量像机安装参数

将图8.6.1中用于拍摄目标图像的像机称为测量像机。与安装参数可能受到扰动的测量像机固连修正像机。修正像机与测量像机之间的相对位置姿态在地面进行标定。在追踪器上选取一些不动的特征作为基准参考体，配置修正像机时使其对准基准参考体。在视觉引导过程中，修正像机实时采集和处理基准参考体的图像，得到修正像机相对于基准参考体的位置姿态变化情况；再结合已在地面标定的测量像机与修正像机间的位置姿态关系，计算测量像机相对于基准参考体的位置姿态参数变化情况，并用来修正目标位置姿态参数测量结果。这一过程相当于将在第九章介绍的折线光路像机链方法中由两台像机固连构成一级接力站的情况，读者可参阅该章内容。

(2) 基于光束法平差修正易受扰动参数

基于2.4节介绍的光束法平差方法，可以有选择地将测量系统中易受扰动的参数与目标位置姿态参数共同作为平差参数进行平差优化，消除扰动的影响。基于光束法平差优化的抗扰动测量方法可以对像机内参数、像差系数、双像机间相对位置姿态参数及目标体结构参数的扰动进行修正。

对于单目测量情况，如果像机安装参数受到扰动，就失去了像机与追踪器之间的相

对关系基准，因而单目测量平差不能消除像机安装参数受到的扰动；对于双目测量情况，如果双像机安装参数同时受扰动并且相互之间没有约束条件，则失去像机与追踪器之间相对关系基准，也无法通过光束法平差消除扰动影响。对这些情况可采用前述的固连修正像机的方法来修正测量像机的安装参数。

8.6.3 地面验证试验

地面验证试验系统主要包括CCD像机、模拟目标器、六自由度精密转台、DSP（数字信号处理器）和标定板组成，如图8.6.2(a)所示。其中(b)为测量试验中拍摄的模拟目标器的一幅图像，(c)为测量试验前将标定板安装在转台上进行拍摄，用于标定像机参数。

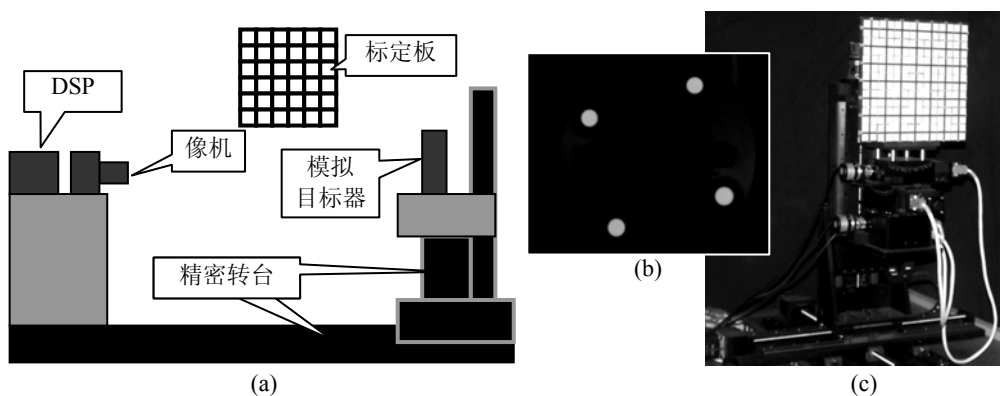


图8.6.2 自主交会对接视觉引导测量地面验证实验系统

试验中，通过转台控制模拟目标器做高精度的六分量运动（沿三坐标轴平移和绕三坐标轴旋转），并给出其运动参数的真值。像机实时采集目标图像并测量目标位置和姿态，将测量结果与真值进行比较分析。物距5米时多次试验结果的标准差如表8.6.1。其中对一台像机外参数施加了随机扰动。

表8.6.1 自主交会对接视觉引导测量试验结果标准差

求解方式	相对位置分量标准差(mm)			相对姿态分量标准差(°)		
	T_x	T_y	T_z	A_x	A_y	A_z
不消除扰动求解	43.90	38.15	3.27	0.56	0.61	0.49
消除扰动求解	0.04	0.33	0.81	0.02	0.02	0.01

可见，在测量系统参数受扰动后，不消除扰动的常规方法的测量误差已相当显著；而采用消除扰动的方法仍得到了与测量系统参数不受扰动时精度相当的测量结果。

参考文献

- [1] Jinling Wang, Matthew Garratt, Andrew Lambert. Integration of GPS/INS/vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles[C]. XXI Congress of the Int. Society of Photogrammetry & Remote Sensing, 2008.7.

- [2] 于起峰, 李强, 雷志辉 等. 基于序列图像的无人机自测速方法与实验[J]. 航空学报, 2009.
- [3] C. Harris and M. Stephens: A Combined Corner and Edge Detector [C]. Proc. of 4th Alvey Vision Conf. Manchester. 1988: 189-192.
- [4] Forstner W, Gulch E. A fast operator for detection and precise location of distinct points[C]. Corners and Centres of Circular Feature. Intercommision Conference on Fast Processing o f Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, 1987.
- [5] 刘晓春. 基于实时图与卫片的景象匹配导航技术研究[D]. 国防科学技术大学硕士学位论文, 2008.12.
- [6] 付文兴, 王建民, 金善良. 一种实用的景象匹配区选择方法[J]. 宇航学报, 2003,24(4):2.
- [7] 刘晓春. 基准图与实时图公因子提取方法研究与实验[J]. 红外与激光工程, 2009.
- [8] 张小苗. 机载视觉着陆导航测量方法及关键技术研究[D]. 国防科学技术大学博士学位论文, 2008.9.
- [9] Sato M, Aggarwal J K. Estimation of Position and Orientation from Image Sequence of a Circle[C]. Proceeding of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997, 2252-2257.
- [10] Sharp C S, Shakernia O, Sastry S S. A Vision System for Landing an Unmanned Aerial Vehicle. Proceeding of the International Conference on Robotics and Automation, 2001(1): 1720-1727.
- [11] 邱力为, 宋子善, 沈为群. 用于无人直升机着舰控制的计算机视觉技术研究[J]. 航空学报, 2003, 24(4): 351-354.
- [12] Zhang Xiaomiao, Yu Qifeng. Comparative High Contrast Area Extraction in Image Based on Spatial-Contrast Feature[C]. Computer Graphics, Imaging and Visualization New Trends, IEEE International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization(CGIV'05), 2005, 133-136.
- [13] Zhang Xiaomiao etc. Salient Image Area Segmentation Based on Spatial-Contrast Feature[J]. International Journal of Pattern Recognition and Machine Intelligence, 2006, 1(5-6): 138-143.
- [14] 张小苗 等. 一种基于空间对比度的光斑自动定位新方法[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 82-87.
- [15] 张小苗等. 面向机场环境的机载单目视觉助降测量方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(4): 236-238.
- [16] 张小苗 等. 一种基于单幅跑道图像的无人机降落位姿测量新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1): 19-24.
- [17] R. Hartley, A.Zisserman. MultipleView Geometry in Computer Vision[M]. Cambridge University Press, 2000.
- [18] 刘勇, 吴德伟. 仪表着陆系统远区场飞行检验方法研究[J]. 空军工程大学学报, 2003(8): 23-26.
- [19] 冯江等. 飞机自动着陆引导的 GPS 导航系统[J]. 兵工自动化, 2004, 23(6): 1-5.
- [20] 李正强, 王宏力, 杨益强, 谢芳. INS/GPS 无线电近程导航系统[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(5): 40-48.
- [21] Etinger S M, Nechyba M C. Vision-Guided Flight Stability and Control for Micro Air Vehicles[C]. Proceedings of IEEE International Conference Intelligent Robots Systems, 2002, 3: 2134-2140.
- [22] Hanbury. The morphological top-hat operator generalised to multi-channel images [C]. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004.8.
- [23] 干国强, 邱致和. 导航与定位——现代战争的北斗星[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [24] 戴隆滢. 巡航导弹及其克星[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.

- [25] 王艳军, 王进, 戴光华等. 巡航导弹制导方式及其电子对抗途径分析[J]. 航天电子对抗, 2006(3): 9-11.
- [26] J Lopez, M Markel, N Siddiqi, et al. Performance of passive ranging from image flow[C]. Proceedings of Tenth International Conference on Image Processing, Barcelona, 2003(1): 929-932.
- [27] S Hrabar, G Sukhatme, P Corke, K. Usher, et al. Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, 2005: 3309-3316.
- [28] Templeton T, Shim D H., et al. Autonomous vision-based landing and terrain mapping using an MPC-controlled unmanned rotorcraft[C]. International Conference on Robotics and Automation, Roma, 2007: 1349-1356.
- [29] C Geyer, T Templeton, M Meingast, et al. The recursive multi-frame planar parallax algorithm[C]. Proceedings of Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, Chapel Hill: 2006.
- [30] A Johnson, J Montgomery, L Matthies. Vision guided landing of an autonomous helicopter in hazardous terrain[C]. Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, 2005: 3966-3971.
- [31] M R Stevens, M Snorrason, R Eaton, et al. Motion imagery navigation using terrain estimates[C]. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, 2004(4): 272-275.
- [32] 吴宏鑫, 胡海霞, 解咏春, 王颖. 自主交会对接若干问题[J]. 宇航学报, 2003, 24(2): 132-137.
- [33] 蔡喜平, 戴永江, 赵远, 王岩. 运用计算机视觉对空间飞行器交会对接中的位置和姿态的测量[J]. 宇航学报, 1995, 16(4): 80-84.
- [34] Wigbert Fehse. Automated Rendezvous And Docking Of Spacecraft[M]. Cambridge Univ. Press, 2003.
- [35] Richard T.Howard, Helen J. Cole, Jorn L. Jackson etl. Automatic rendezvous and docking system test and evaluation [J]. SPIE, 1997, vol.3065: 131-139.
- [36] 尚洋, 于起峰. 基于视觉抗扰动测量空间目标位置姿态[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 938-942.

第九章 折线光路像机链摄像测量原理与应用

前面介绍的摄像测量学的基本原理、方法和技术，都是基于摄像机能够直接拍摄到具有足够分辨率的物体图像的基础上的，是直线光路的摄像测量方法及技术。而在待测量的两个物体之间在空间上不能通视，或者两个物体与摄像机之间的视角、视场太大，或者摄像机安放在不稳定的平台上等条件下，对需要测量和监测这两个物体之间的三维位姿、变形的实际需求，上述传统的摄像测量原理和方法不能适用。

本章介绍作者发明的折线光路像机链摄像测量的基本原理及关键技术。我们用像机链和标志物组合构造折线光路，将空间任意区域联系起来，高精度测量包括超大视角和不通视的任意区域目标间的相对三维位置、姿态及其变形。与普通激光折线光路进行二维传递不同，折线光路像机链摄像测量方法能够折线传递三维几何信息，严格地说是六维（三个位置和三个角度）几何信息。本方法可以解决上述传统方法无法解决的难题，为精密光测图像技术、摄像测量学理论和技术的发展引入了新思路，开辟了新领域。折线光路像机链摄像测量方法的研究与进展将大大拓宽光测图像技术的应用，将在船体、地下工程及其它大型结构的变形测量、力学分析、结构监测方面发挥重要作用。

9.1 折线光路像机链摄像测量的背景和意义

舰船、隧道工程、桥梁和大坝等大型结构的变形测量问题是工程施工或使用监测中的关键和难点问题之一。在许多大型结构工程中有测量不通视目标之间、超大视角目标之间的位置、姿态及其变化量的实际需求。

舰船在海上航行时，由于受海面波浪冲击、日夜温差、负载变化、长期老化或战斗损伤等内外部受力和外部环境变化因素的影响，会产生不可忽视的船体变形^[1]。根据国际、国内相关学者的研究，货物和燃料分布变化、船体不同部位不均匀日晒等因素引起的舰船静态挠曲变形高达 $1^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ ；船体运动、海浪冲击、转舵操作等因素会引起动态弹性变形，甲板平面在偏航方向的变形可能有几个角分，纵摇角变形达几十角分；在太阳的作用下，船体结构在一天之内会产生较为显著的 1° 左右的挠曲角变化^[2,3]。

这些船体的变形参数对舰船的设计、建造、使用、寿命预估和疲劳断裂性能评估等都有重要的意义。特别是船体变形直接使得甲板上探测器、武器系统的实际姿态角与主惯导所提供的舰船姿态角信息之间产生误差，导致舰载观测系统如雷达等设备的性能和精度下降，舰载武器装备的对准、打击精度降低。

因此对这些舰船、飞机等大型结构的变形量进行测量，并对变形引起的误差进行补

偿、修正具有重大需求。在国内外船舶领域，近一、二十年来相关研究人员做了很大努力，研究船体变形的测量与校正技术，消减船体变形引起的误差。然而由于舰船结构尺度大、变形复杂，变形测量难度大，目前仍没有一种公认有效的、成熟的测量方法。例如采用光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating, FBG）对船体结构关键部位的应力和应变进行测量、结构试验和健康监测，但由于难以建立精确的从应变数据到姿态角的转换模型，阻碍了主要的姿态角修正的应用^[4-6]；采用局部捷联式航向姿态基准（Attitude and Heading Reference System, AHRS）进行船体动态变形校正，由于保精度工作时间较短，测量误差随时间积累而增加；采用三轴激光陀螺组件（Laser Gyro Unit, LGU）测量船体变形的的方法，很难建立足够精确的计算模型，并且也有时间误差累积的问题^[2]。

在民用领域，隧道、坑道、地铁建设或井下施工过程中，如果由于施工或地质原因导致围岩变形甚至坍塌事故，往往会造成重大的财产损失和人员伤亡。实时和高精度地对隧道围岩变形进行测量和监控，对于地下工程的安全减灾至关重要^[7]。GPS 等卫星定位方法已在大型工程施工中用来进行定位和监测，但卫星定位方法无法在地下工程中使用。工程全站仪等可以使用多站转接绕过障碍物等方式对不可通视点进行测绘，但只能确定待测点的点位，不能给出目标的三维位置姿态结果；特别是该法的布站过程繁杂，对于动态问题不能给出实时、连续的测量结果。

摄像测量方法具有精度高、非接触、可测参数多、成本低等重要优点，可用于物体的三维位置、姿态及其变形测量。但传统的摄像测量方法只能测量可通视物体之间的变形。由于舰船结构比较复杂，舰船上基准平台与待测目标（如武器系统、观测装备等）之间一般不存在通视光路。对于地下工程，由于基准点经常设在地面，并且地下空间有限，通视距离往往较短，因此待测目标与测量基准平台之间通常没有可通视光路。此外一些在振动、不稳定环境中的测量任务，无法保证摄像机安装平台的稳定，也就无法直接高精度得到待测目标真实的运动或变形参数。

对于上述需要测量相对位置和姿态关系的两个物体之间不通视，或者两个物体与摄像机之间的视角、视场太大，或者摄像机安放在不稳定平台上等实际工程应用需求，传统的摄像测量原理和方法无法完成三维运动和变形的测量和监测任务。而我们发明的折线光路像机链摄像测量的原理和方法，解决了两个或多个不通视物体间相对位置、姿态和变化量测量，超大视角物体间相对位置、姿态和变化量高精度测量，和测量平台不稳定条件下的高精度测量等一大类难题。特别是对于动态问题，可以实时、连续、长时间的测量相对变形，可操作性强，测量精度高。

本方法的理论和技术已经获得国家发明专利两项，并正在申请国际发明专利一项，是一种具有完全自主知识产权的新思路、新方法。

9.2 折线光路像机链摄像测量原理

折线光路像机链摄像测量是指在待测目标与测量基准之间设置由像机链和标志物组合构成的折线摄像测量光路，并综合利用各种标定和三维测量技术与算法，高精度测量待测目标相对于测量基准的位置、姿态和其变化等。如图 9.2.1 是构成折线光路像机链的一种方式。折线光路中的每一级节点 S_1 、 S_2 等称为传递站。第一级传递站与待测目标之间、相邻传递站之间、最后一级传递站与测量基准之间是可通视的。首先分别得到待测目标与第一级传递站之间、相邻传递站之间、最后一级传递站与测量基准之间的相对位置、姿态，再将各级位置、姿态的测量结果综合传递转换计算，最终得到待测目标相对于测量基准的位置、姿态及其变化量。

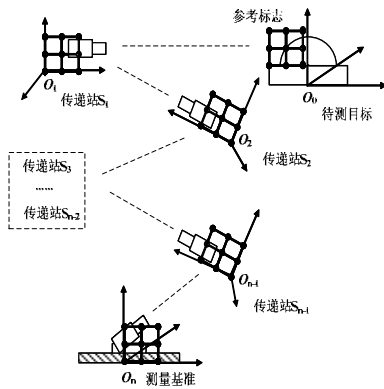


图 9.2.1 多级传递站构成折线光路像机链的一种方式

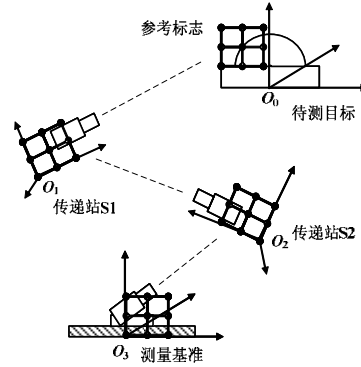


图 9.2.2 两级传递站构成的折线光路像机链

9.2.1 相对位置姿态参数多级综合传递转换计算

下面以如图 9.2.2 所示的包含两级传递站的折线光路像机链为例阐述本方法的传递测量的原理。我们知道，两个空间坐标系之间的变换可以通过一次旋转运动和一次平移运动来实现。即对于一个空间点分别在两个坐标系中的坐标 P 和 P' ，有

$$P' = RP + T \quad (9.2.1)$$

其中 R 为由三个姿态角的三角函数组合成的旋转矩阵， T 为平移向量。它们描述了两个坐标系之间的相对位置姿态关系。

以下称待测目标与其固连参考标志为第 0 级，测量基准与其固连摄像机为第 3 级，中间的两级由摄像机及其固连参考标志构成的传递站为第 1 级和第 2 级。用 $(R_{i,j}, T_{i,j})$ 表

示第 i 级和第 j 级之间的旋转矩阵和平移向量，则图 9.2.2 中各相邻级之间的旋转矩阵和平移向量分别为 $(R_{0,1}, T_{0,1})$ 、 $(R_{1,2}, T_{1,2})$ 、 $(R_{2,3}, T_{2,3})$ 。设空间点 P 在第 0 级中坐标为 P_0 ，则它在第 1 级中的坐标为

$$P_1 = R_{0,1}P_0 + T_{0,1} \quad (9.2.2)$$

在第 2 级中的坐标为

$$P_2 = R_{1,2}P_1 + T_{1,2} = R_{1,2}R_{0,1}P_0 + R_{1,2}T_{0,1} + T_{1,2} = R_{0,2}P_0 + T_{0,2} \quad (9.2.3)$$

所以有

$$R_{0,2} = R_{1,2}R_{0,1}, \quad T_{0,2} = R_{1,2}T_{0,1} + T_{1,2} \quad (9.2.4)$$

类似地可以得到

$$R_{0,3} = R_{2,3}R_{1,2}R_{0,1}, \quad T_{0,3} = R_{2,3}(R_{1,2}T_{0,1} + T_{1,2}) + T_{2,3} \quad (9.2.5)$$

可以看出，传递后旋转矩阵的计算只与各相邻级间的旋转矩阵有关，即计算待测目标相对于测量基准的姿态角只与各相邻级间的转角有关，而与位移量无关。

如果一级或两级传递站还不能将测量基准和待测目标联系起来，则需要如图 9.2.1 所示设置多个传递站。设从待测目标到测量基准依次设置传递站 $S_i, i=1, \dots, n-1$ ，构成折线光路，待测目标与其固连参考标志为第 0 级，测量基准与其固连摄像机为第 n 级。

通过处理分析各级像机所采集的相邻级的合作标志图像，得到各相邻级传递站间的相对位置姿态参数 $R_{i,i+1}, T_{i,i+1} (i=0, \dots, n-1)$ 。则可以通过与前述类似的推导过程，得到待测目标相对于测量基准的三维位置姿态参数 $R_{0,n}$ 和 $T_{0,n}$ 为

$$R_{0,n} = \prod_{i=0}^{n-1} R_{i,i+1}, \quad T_{0,n} = T_{n-1,n} + \sum_{i=0}^{n-2} \left[\left(\prod_{j=i+1}^{n-1} R_{j,j+1} \right) T_{i,i+1} \right] \quad (9.2.6)$$

9.2.2 传递站与单路传递形式

折线光路测量的各级传递站由摄像机和标志物固联组成，其组合方式有多种，原则是满足相邻级传递站间相对位置姿态的测量需要，即本级像机能够拍摄相邻级的合作标志，或本级的合作标志能被相邻级像机拍摄到。传递站的几种形式如图 9.2.3 所示，其中 M 表示合作标志，C 表示摄像机。图 9.2.3(a)由像机和合作标志组成，(b)只由合作标志组成，(c)由两台像机组成。传递站中的像机也可以是多台像机组成的像机组。传递站组合方式灵活多变，能够适应多种不同的应用场合。根据测量任务，还可能需要在待测目标或测量基准上设置合作标志或像机。

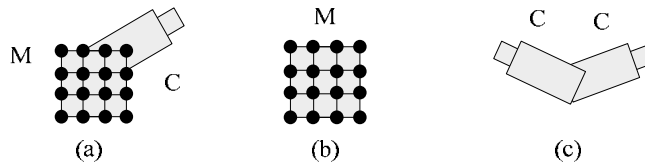


图 9.2.3 折线光路摄像测量传递站的几种形式

传递站的多样性决定了由传递站构成的像机链的形式变化多样。图 9.2.4 给出了几种折线光路像机链的构成形式，其中 B 表示测量基准， G 表示测量目标， M 表示标志物， C_1 、 C_2 、 C_3 表示像机。

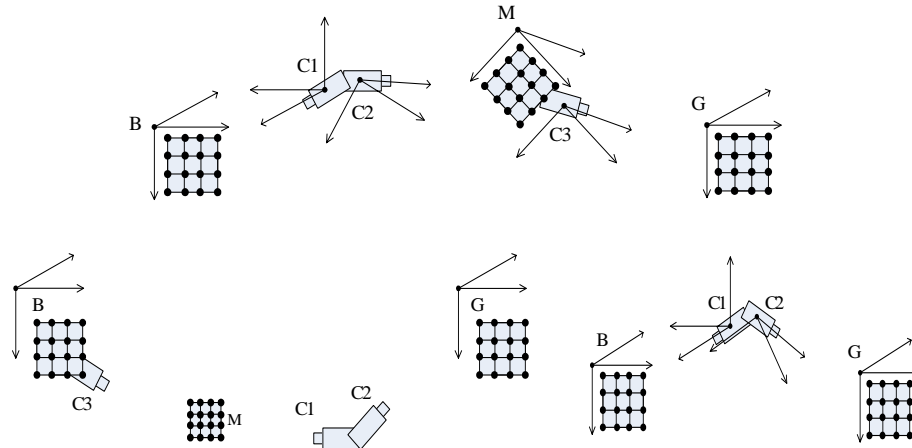


图 9.2.4 折线光路像机链的几种构成形式

上述的像机链传递形式中，待测目标和测量基准都是唯一的，两者之间由多级传递站串联起来构成一条折线光路，这种传递形式称为单路传递。

9.2.3 加装激光测距仪的传递站和像机链形式

在实际测量中，如果待测目标的位置变化量不大，或者对目标的位置及其变化量不感兴趣，只需要测量目标间的相对姿态及其变化量，根据式(9.2.6)，则不需考虑各传递站间的相对位置关系及其变化。而当需要高精度测量目标相对位置时，由于单像机测量在远距离、小视场条件下，对目标轴向相对距离的解算精度不高，因此通过在各传递站上加装激光测距仪，综合利用激光测距结果和各级图像分析结果，可以高精度解算目标的相对位置和姿态信息，如图 9.2.5。

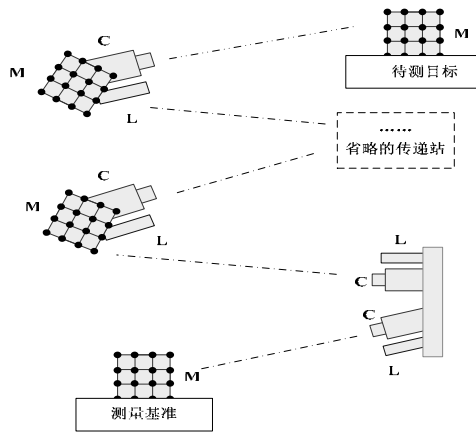


图 9.2.5 加装激光测距仪的传递站及像机链形式

9.2.4 多路与网络传递形式

在上述单路传递形式的基础上，我们进一步发展了多路与网络传递形式，以满足各种不同条件和不同需求。下面举几个多路与网络传递形式的实例。根据实际环境情况和测量要求可以灵活设计传递站和传递形式。

1) 当需要实时测量多个待测目标相对同一个测量基准的位姿和其变化情况时，可构造如图 9.2.6 所示的星形像机链，从测量基准发出多条折线光路连接各待测目标，实现对多个目标的测量。

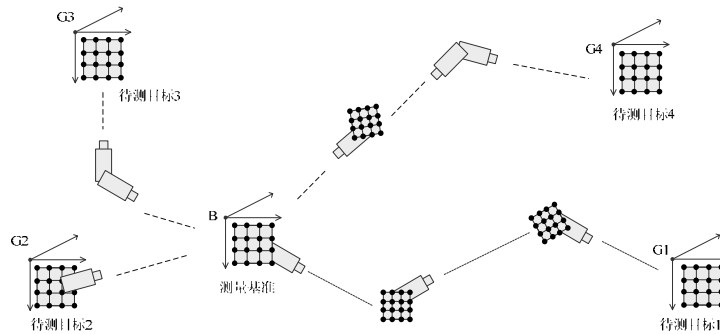


图 9.2.6 星形像机链同时测量多个目标

2) 当某待测目标的数据很重要，可靠性和精度要求高，可通过两路或多路折线光路构成闭合回路进行测量并进行数据融合。像机链形式如图 9.2.7 所示。

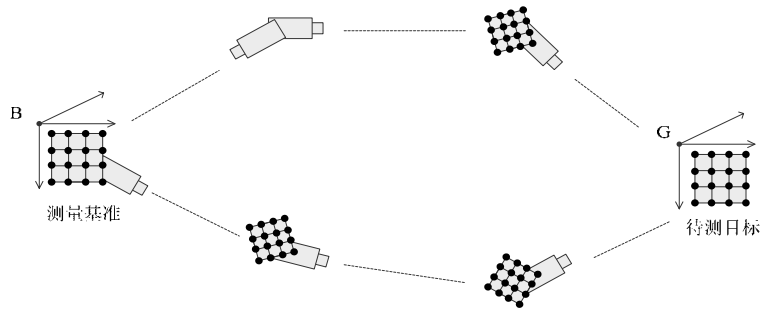


图 9.2.7 两路像机链构成闭合回路测量同一个目标

3) 对大型船体、坑道、围岩等的变形测量和监测，需要测量大量的分散待测点时，可以增加部分传递站的像机台数，成为多目传递站。以这些多目传递站作为结点，构成像机链网络，实现对多个分散目标的测量，如图 9.2.8。

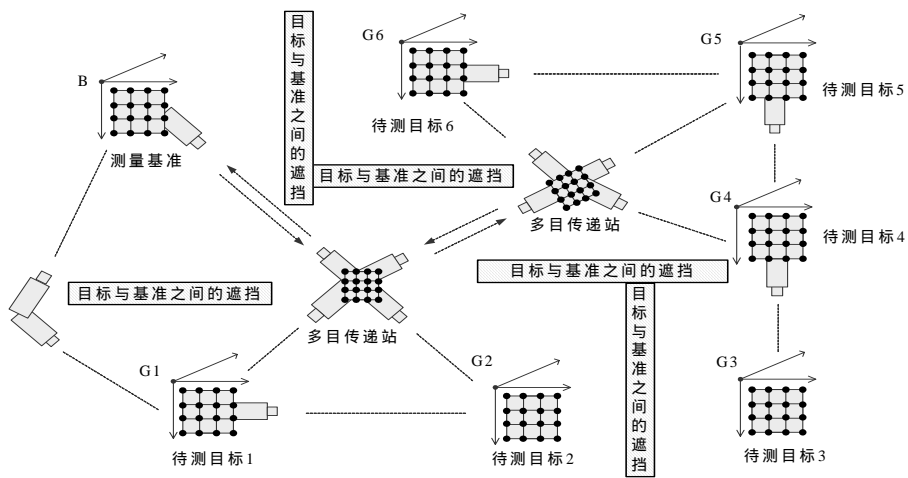


图 9.2.8 构建像机链网络测量分散目标

9.3 折线光路摄像测量的实现与精度分析

根据实际环境情况和要求完成传递站和像机链或像机网络的设计后，按图 9.3.1 所示的流程进行测量工作。下面将对其中重要的几个步骤和算法精度加以阐述和分析。

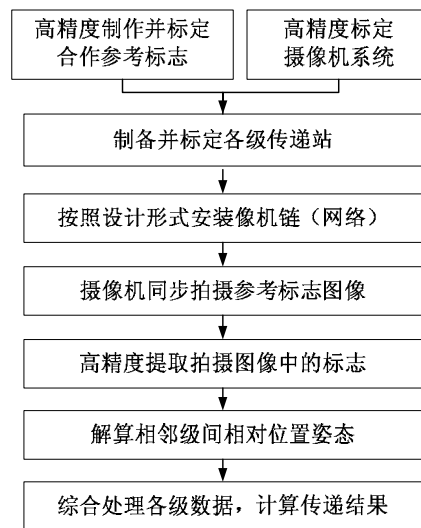


图 9.3.1 折线光路像机链摄像测量的工作流程

9.3.1 折线光路摄像测量的实现

(1) 高精度制作并标定参考标志物

参考标志为多个控制点或控制线构成的平面或立体形式的标志物，各控制点或控制线间的几何关系需要精确已知。当参考标志物用于和待测目标或和测量基准固连时，也可以直接绘制在待测目标或测量基准的基座上。标志上控制点或线之间的关系通过精密加工或标定得到。

(2) 高精度标定摄像机系统

需要事先对摄像机进行标定，得到摄像机的主点位置、等效焦距、像差系数等内参数。这是摄像测量的一项最基本、最重要的工作，在前面章节中已有阐述。

(3) 制备并标定各级传递站

根据所设计的传递站形式将摄像机、标志物和激光测距仪（可选）固连在一起构成传递站，并标定各传递站中摄像机和标志物之间的相对位置姿态。标定内容包括：1) 测量基准和固连的摄像机或标志物之间的相对位置姿态；2) 各级传递站中摄像机和固连的参考标志物之间的相对位置姿态；3) 待测目标和固连的参考标志物或摄像机之间的相对位置姿态；4) 双（多）像机传递站中的像机之间的相对位置姿态；5) 激光测距仪和合作标志间相对位置姿态。这些标定在摄像测量中有许多通用方法，也可有专用标定方法。标定完成后，必须保证这些组件之间的关系在测量过程严格不变。

(4) 安装像机链

将各传递站按照像机链设计形式给定或选定大体安装位置，调整好传递站中摄像机

的拍摄角度后再进行固定。折线光路摄像测量方法对传递站的安装位置和姿态的要求不高，原则是使各摄像机的视场包含所要拍摄的合作标志，且传递站之间的相对位置及姿态在测量过程中不发生明显影响测量结果的变化。

(5) 摄像机同步拍摄标志物图像

拍摄测量过程中，同步触发各像机和激光测距仪，各像机分别对其所指向的相邻传递站合作标志或待测目标采图，同时激光测距仪测量其所指向的相邻传递站合作标志或待测目标的距离。

(6) 高精度提取拍摄图像中的标志点或线

对于十字丝标志，可采用相关系数拟合极值法精确提取标志中心位置；也可以采用直线提取方法直接提取出构成十字丝的两条直线，其交点就是十字丝中心位置。合作标志中心位置的定位精度一般优于 0.1 像素，理想情况下能够达到 0.01 像素。

(7) 计算单级位置姿态信息

通过分析处理合作标志图像，解算合作标志相对于像机的三维位置姿态参数，是摄像测量、计算机视觉中的一类基本问题。待求解的未知数是 3 个姿态角和 3 维位置分量，只要知道 3 个以上的合作标志点的空间坐标及其图像坐标，即可求解这 6 个未知数。当标志点数目多于 3 个时，可以利用最小二乘法求解消减噪声的影响。这方面的论述及具体算法很多，不做赘述。

(8) 综合处理多级像机传递测量结果

根据各个相邻传递站间的相对位置姿态测量结果，从测量基准向待测目标逐级累计，根据式(9.2.6)，计算得到待测目标相对于测量基准的三维位置和姿态。

9.3.2 多级传递测量姿态角的精度分析

由公式(9.2.6)可知，多级传递测量的旋转矩阵等于各级旋转矩阵的连乘积，因而多级传递测量姿态角的精度与各级旋转矩阵的计算精度有关。而相邻两级传递站之间旋转矩阵的测量精度不仅与各像机拍摄测量下一级参考标志相对姿态的精度有关，还与传递站中两台摄像机之间或摄像机与固连的参考标志之间相对关系的标定精度有关。除了传递级数和传递站的布局，传递测量的精度主要受以下几个方面的影响：像机分辨率、标志提取精度、位置姿态求解算法的精度和各传递站像机参数、像机与固连参考标志之间相对关系的标定精度。

本节主要分析像机链传递测量相对姿态角的精度。传递后的旋转矩阵是多个旋转矩阵相乘的结果，所以多级测量的误差传递是多个旋转矩阵相乘的误差传递。因为旋转矩

阵的每个元素是三个姿态角正余弦函数的组合，所以解析求解姿态角误差传递函数比较困难。下面对这一误差传递情况进行数值仿真研究。

首先随机生成 n 组姿态角，得到 n 个单级旋转矩阵，将这些旋转矩阵相乘后得到传递测量旋转矩阵，并从中分解出传递测量姿态角；然后分别在各单级旋转矩阵的姿态角中加入服从正态分布的随机误差，将引入随机误差后的各单级旋转矩阵相乘得到引入误差的传递测量旋转矩阵，并从中分解出引入了误差的传递测量姿态角；将有误差的姿态角测量结果与引入误差前的结果进行比较，得到对应的三个姿态角的传递误差。

图 9.3.3 是给单级姿态角加入均方根为 15 角秒的误差，通过数字仿真得到的姿态角传递误差与单级旋转矩阵个数的关系曲线。在此仿真实验结果中，15 角秒的单级姿态角误差经过 5 级传递后，传递误差为 32.5 角秒。可见，传递级数的增加并不会使测量误差成倍增加。

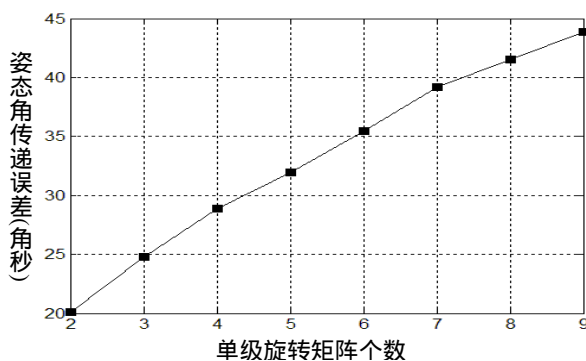


图 9.3.3 姿态角误差与传递矩阵个数的关系

9.4 折线光路像机链摄像测量的应用与验证试验

折线光路像机链摄像测量方法能够解决两个或多个不通视物体间或超大视角物体间相对位置、姿态和变化量的测量，因此能够应用于舰船、地铁施工、隧道工程、桥梁和大坝等大型结构的变形监测。本节研究该方法的应用，并进行部分试验验证。

9.4.1 船体变形测量应用

由于折线光路摄像测量方法可以测量不通视物体之间的位置和姿态，我们将其应用于舰船上观测设备、武备或其它位置的位置及姿态角变化和变形测量。图 9.4.1 为甲板上某雷达系统的变形测量系统示意图。

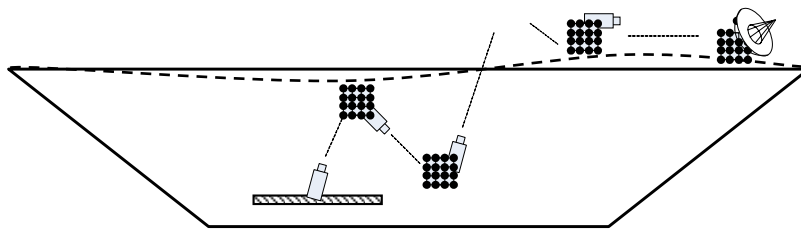


图 9.4.1 船体变形折线光路像机链摄像测量系统

图中, p 为主基准, 可以是舰船导航基准的惯性导航平台, 也可以是其它选定的基准, 如船体龙骨上某一位置。 t 为待测目标, 可以是雷达系统, 或其它感兴趣的变形测量点。由于折线光路传递形式多样, 且摄像机拍摄距离可以通过镜头焦距方便调节, 因此待测目标可以处于任意位置。在测量基准和待测目标上安装像机或合作标志物, 与两者之间的各级传递站共同构成折线光路像机链。传递站的数量和实际传递形式取决于应用环境, 可灵活选择。各传递站中摄像机和标志之间的相对姿态通过标定得到。同步触发各摄像机采图, 通过图像处理和姿态解算求得各相邻传递站之间的相对位置姿态, 根据公式(9.2.6)计算待测目标相对测量基准的位置和姿态。

对船体各个位置的姿态进行连续、实时测量, 可实时得到各个位置的姿态角变化和位移, 从而得到船体变形测量结果。测量结果可直接用于对观测设备或武备由于船体变形产生的姿态角误差进行补偿。如果测量目的是分析船体的刚度、疲劳、断裂等特性, 则需要通过位移-应变模型, 将姿态和位置变形测量量分析转换成船体某位置点的应变和应力情况。

9.4.2 隧道围岩变形测量与监测应用

隧道、地铁等地下工程的施工或运营中, 如果因施工或地质原因而导致围岩变形甚至坍塌事故, 往往会造成重大财产损失和人员伤亡。因此, 对地下工程中隧道断面及围岩等结构的下沉和变形进行实时和高精度测量和监控, 对保证地下工程施工质量和结构安全具有重要意义。

我们采用折线光路像机链摄像测量方法和技术, 将地下监测点与地面上稳定的、已知基准坐标系坐标的工程控制点联系起来, 测量出地下工程的任意位置在基准坐标系下的三维位置和变形, 并可以对地下目标的沉降量、水平位移变形等信息进行长时间连续、实时测量, 得到其相对于地面上固定基准点的绝对位移量。本方法具有无时间漂移、可长时间监测、测量精度高、结构简单方便等优点, 是全新概念的具有自主知识产权的地下工程围岩变形测量的方法与手段。通过与其它类型传感器结合, 可望形成较完整的测

量设备，以达到对隧道施工参数的多方位检测和隧道运营安全的长期、有效监测。

隧道围岩变形测量与监测系统如图 9.4.2 所示。其工作原理为：在地面上已知基准坐标系坐标的工程控制点 B_0 和地下待测目标点 W 之间构造折线光路，在折线光路的每个拐点处布置“摄像传递站”，传递站组成形式灵活。连续、实时测量各时刻的该点相对地面参考点的位置与姿态可实现对该点的三维位移、变形的监测。

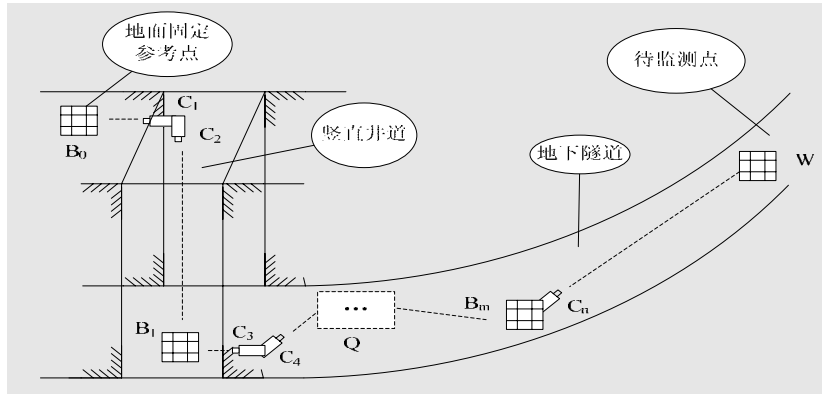


图 9.4.2 隧道围岩变形监测的折线光路像机链摄像测量系统

9.4.3 折线光路像机链摄像测量验证试验

实验室验证试验系统如图 9.4.3 所示。为了模拟船体变形测量和隧道围岩变形测量的环境特点，我们把测量基准 B 放置在 1 楼，把待测目标 G 放置在 2 楼，通过在楼梯拐角处设置两个传递站 $C1-C2$ 、 $M-C3$ 将测量基准和待测目标之间联系起来。测量基准 B 在地面上固定不动，每个传递站中组件如摄像机 $C1$ 和 $C2$ ，摄像机 $C3$ 和标志 M 之间刚性连接。为了得到角度变形和位移的测量精度，将待测目标 G 放置在一个精密数控转台上。 G 坐标系和转台坐标系调整一致。其中，摄像机分辨率为 1600×1200 像素。

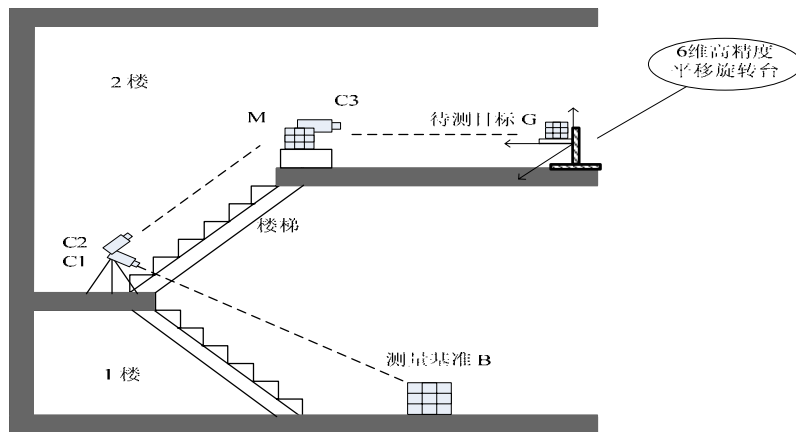


图 9.4.3 折线光路像机链摄像测量验证试验系统

首先，标定三台摄像机的内参数和传递站组件之间的相对位置姿态参数。然后，将转台绕 X、Y、Z 轴旋转一系列角度并记录真值，控制各摄像机同步采图。根据折线光路像机链摄像测量方法计算得到目标标志的转动角度，与真值进行比较，衡量姿态角变化测量精度。最后，将转台沿 y 轴平移一系列距离，比较测量位置变化的精度。

为了模拟船体变形等测量环境中的不稳定因素的影响，在基准转台旋转或移动的同时，对两级传递站进行人为干扰，将其整体随意旋转或移动，但标志不能超出像机视场。理论上说这些干扰不应影响最终的测量结果。表 9.4.1 给出了目标标志运动参数测量值与显示真值间误差的均方根。其中，RMS of A_X (Y、Z) 表示绕 X (Y、Z) 轴旋转角度量的测量误差均方根，RMS of T_Y 表示沿 Y 轴位移的测量误差均方根。试验结果表明，折线光路像机链摄像测量方法能够高精度测量得到不通视目标的相对位置和姿态参数。对于室外应用，还要考虑更多的影响因素。使用高分辨率摄像机和改进标定、三维解算算法等，可以进一步提高测量精度。

表 9.4.1 验证试验结果误差

RMS of A_X	RMS of A_Y	RMS of A_Z	RMS of T_Y
56.4 角秒	43.7 角秒	47.7 角秒	0.16 毫米

本章研究内容得到国家自然科学基金科学仪器基础研究项目专款资助，项目编号：10727202。

参考文献

- [1] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. London: Peter Peregrinus Ltd., 1997.
- [2] A.V Mochalov, etc., Use of the ring laser units for measurement of the moving object deformation[C], Proceedings of SPIE, 2002, 4680: 85-92.
- [3] T. Okada, etc. On board measurement of stresses and deflections of a Post-Panamax containership and its feedback to rational design[J], Marine Structures, 2006 (19): 141-172.
- [4] C.Baldwin, etc., Fiber optic structural health monitoring system: rough sea trials testing of the RV Triton[C], Oceans 2002, Proceedings of MTS/IEEE, 2002(3): 1806-1813.
- [5] J. S. Kiddy, etc., Hydrostatic Testing of a Manned Underwater Vehicle using Fiber Optic Sensors[C], Oceans 2005, Proceedings of MTS/IEEE, 2005: 1-6.
- [6] K. Pran, etc., Instrumentation of a high-speed surface effect ship for structural response characterisation during seatrials[C], Proceedings of SPIE, 2002, 3986: 372-379.
- [7] Bassett R H, Kimmance J P, Rasmussen C. Automated electro-level deformation monitoring system for tunnels[C]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 1999.

第十章 测量点目标运动参数的单目运动轨迹交会法

从前面的摄像测量和计算机视觉原理可知一个基本结论：双目视觉可以通过交会测量确定任意形式目标的三维几何信息；而单目视觉在不增加辅助约束的情况下只能确定目标的视线角方向，无法确定目标距离量，即无法定位。当单目视觉在运动平台上对一固定目标进行测量，运动平台相对于固定目标运动到相差一个合适角度时，分别对目标拍照成像，此时相当于双目视觉的情况，可以对目标进行定位。而当点目标位置有变化时，运动平台单目从不同角度拍照的两幅或多幅图像中的同一目标不在同一空间位置，无法进行点交会。因此如果不增加其它约束条件，运动平台单像机不能对运动点目标的运动参数进行测量。

然而，实际测量任务中常有一类机动平台单目对运动目标进行观测的问题，由于目标也在运动，常规的摄像测量方法不能适用。这种情况在机器人对抗赛、机器人足球赛等动态场景应用中非常常见。机器人在运动过程中要实时测量出对方机器人或足球等运动目标的三维运动状态，包括沿像机轴向上的距离信息在内的三维轨迹以及速度和加速度。在国防试验和武器研制中也有类似的需求。这种运动平台单目测量运动目标三维运动参数，是一大类典型的测量需求，然而还没有有效解决这类问题的单目视觉测量方法。

目前对单目测量目标运动参数的研究较多，其本质都是通过增加单目视觉约束来解决单目定位问题。这些方法主要有：通过增加激光测距仪等辅助设备，得到目标的相对距离信息进行求解^[1-3]。第六章介绍的利用体目标上多个已知特征点求解目标的位置和姿态的方法，如解决“PNP”问题的各种方法。该方法由于需要体目标的一些先验信息，对点目标无效。基于结构光的方法^[4,5]。由于视场范围很小，无法在运动平台应用。只适用于深度变化显著情况的从散焦图像恢复目标深度信息的方法^[6-8]。需要设计复杂光路的单像机虚拟立体视觉测量方法^[9,10]。需要知道目标初始位置或姿态的速度递推更新求解的方法^[11]等。这些方法都不能解决上述的运动单目测量点目标运动参数的问题。

本书作者提出了运动平台单像机测量运动点目标三维运动参数的单目运动轨迹交会法的新概念方法^[12]。在不增加测距设备和目标上无已知控制点的情况下，将运动平台单像机和目标点两者的运动状态与摄像测量三维交会原理结合，在已知像机平台运动参数，并且像机平台与目标之间存在满足一定要求的运动差的条件下，从运动单像机实现了对运动点目标的三维轨迹和速度等运动参数的测量。本方法根据目标所服从的运动规律，假设目标运动在短时间内满足某种参数化的空间曲线运动，作为单目视觉测量的辅助约

束。并且与传统的将像机-目标视线交于一点的交会概念不同，我们将像点、光心与物点的连线与该参数化的目标运动轨迹进行交会，确定轨迹参数，从而求解目标位置和运动参数。这一方法突破了传统摄像测量中运动平台无法测量运动点目标的限制，使摄像测量扩展了一大类应用范围。不用测距仪器，仅用运动单摄像机就可以测量出运动目标的三维轨迹和运动参数，将有广泛、重要的应用前景。

10.1 单目运动轨迹交会法的基本原理

本章涉及的运动目标是点目标，或者目标上无已知结构信息的控制点。如图 10.1.1，世界坐标系为 W -XYZ，对应于不同拍摄时刻 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，像机光心位置为 C_i ，目标的位置为 P_i ，目标成像点为 p_i ，像机光心与目标的连线（观察目标的视线）为 l_i ，这里称之为测量定向线。像机内参数已标定，像机运动可控，因而 C_i 在世界坐标系中的坐标，以及像机的姿态角度都为已知，提取目标像点坐标后，即可确定测量定向线 l_i 。需要求解目标运动参数，即 P_i 在世界坐标系中的坐标。

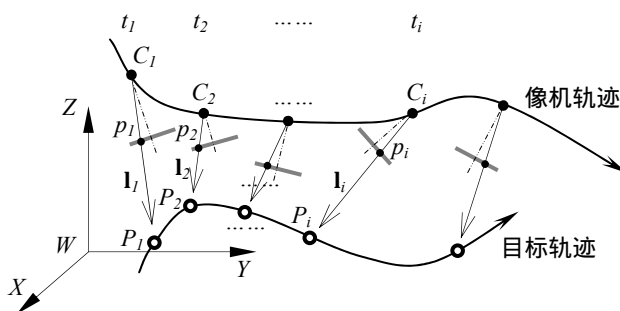


图 10.1.1 运动单目对运动点目标定位问题的描述

从原理上讲，在没有引入额外约束的情况下，基于某时刻的单幅图像，只能根据光心和像点连线确定点目标的方向，即确定测量定向线，而无法得到距离信息，也就无法定位；基于序列图像，由于点目标在不同的时刻处于不同的位置，也无法用传统交会测量方法对其进行三维定位。因此，必须为上述问题增加约束条件，使运动平台单像机对运动点目标三维定位成为可能。

在实际自然时间空间中，真实目标的运动必然是连续有序的，因此在短时间内，通常满足、或近似满足一定的运动规律。如果将这一运动规律用参数化模型来描述，就得到了对于目标运动的约束条件，即在不同时刻，点目标的位置除了要满足成像关系，还要满足一定的运动规律约束。对于不同的应用背景，可采用不同的运动模型。我们假设点目标的运动轨迹可以用某种参数化多项式来近似描述，例如匀速直线运动，或者加速二次曲线运动等。引入这一运动规律约束后，使得从运动单目对运动点目标定位成为可

能。

我们提出了多种算法进行单目运动轨迹交会测量求解。以下先以目标和像机在同一平面内的简单情况为例介绍轨迹参数空间搜索法和平移交会法，再介绍一般情况下的通用解法，即目标和像机都为空间三维运动时的单目三维运动轨迹交会法。

10.2 轨迹参数空间搜索法

为了简化问题的描述，本节和下一节的解算模型以二维平面匀速直线运动为例给出。而实际上本节和下节解算原理并不受此限制，而可以推广到三维空间任意阶多项式解析曲线运动的测量。

在机器人足球赛等许多场合，通常像机平台和目标都是在地面上作二维运动，即像机的运动和目标的运动处于一个平面内。如图 10.2.1，像机和目标的运动都在 W-XY 平面内。设在较小的时间间隔内（如几秒），足球等目标的运动可近似为匀速直线运动，而机器人等摄像平台运动可控，并且与目标的运动有较大的运动差，包括速度方向和速度大小等的差别。像机等时间间隔采图，因而目标在各成像时刻的位置共直线并且等间距。

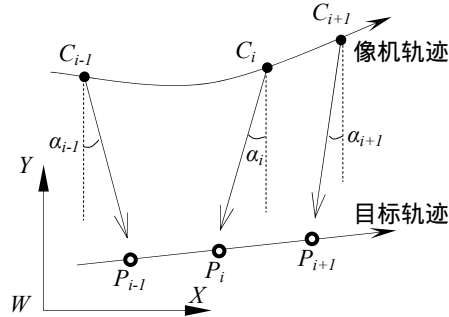


图 10.2.1 轨迹参数空间搜索法示意图

在上述条件下，我们的轨迹参数空间搜索法能够唯一确定目标在各个时刻的位置 $P_i(X_{P_i}, Y_{P_i})$ ，求解过程如下。

设相邻两次成像的时间间隔为 Δt ，第 i 时刻像机光心位置为 $C_i(X_{C_i}, Y_{C_i})$ ，测量定向线 C_iP_i 的方向角为 α_i ，如图 10.2.1。由于像机参数已知，运动可控，因而可以根据目标点图像提取结果确定 α_i 。根据图中的几何关系，第 i 时刻目标位置坐标满足：

$$X_{P_i} - X_{C_i} = (Y_{P_i} - Y_{C_i}) \tan \alpha_i \quad (10.2.1)$$

设目标运动轨迹满足含有待定参数 a 、 b 的直线方程：

$$Y_{P_i} = aX_{P_i} + b \quad (10.2.2)$$

测量定向线 C_iP_i 与目标运动轨迹直线的交点即为目标位置 P_i 。因而联立式(10.2.1)和

式(10.2.2)求解 (X_{P_i}, Y_{P_i}) ，得到：

$$\begin{cases} X_{P_i} = ((b - Y_{C_i}) \tan \alpha_i + X_{C_i}) / (1 - a \tan \alpha_i) \\ Y_{P_i} = (a \cdot (X_{C_i} - Y_{C_i} \tan \alpha_i) + b) / (1 - a \tan \alpha_i) \end{cases} \quad (10.2.3)$$

对于匀速直线运动，相邻目标点连线的线段长度相等，即

$$|P_{i-1}P_i| = |P_iP_{i+1}| \quad (10.2.4)$$

其中

$$(X_{P_i} - X_{P_{(i-1)}})^2 + (Y_{P_i} - Y_{P_{(i-1)}})^2 = (X_{P_{(i+1)}} - X_{P_i})^2 + (Y_{P_{(i+1)}} - Y_{P_i})^2 \quad (10.2.5)$$

将式(10.2.3)代入式(10.2.4)，得到关于待定参数 a 、 b 的方程。选取 4 个以上相邻时刻，可列出 2 个以上形如式(10.2.4)的关系，得到关于 a 、 b 的二元四次方程组。通过在 a 、 b 的参数空间进行搜索来求解 a 和 b 。空间搜索的最小化目标函数为

$$f(a, b) = \min \sum_{i=2}^{n-1} (|P_iP_{i+1}| - |P_{i-1}P_i|)^2 \quad (10.2.6)$$

采用最小二乘等方法得到最优结果 \hat{a} 和 \hat{b} ，代入式(10.2.3)，即计算得到目标在各个时刻的位置 (X_{P_i}, Y_{P_i}) 。

10.3 平移交会法

设目标匀速直线运动的速度为 $\mathbf{v}=(v_X, v_Y)$ ，相邻图像间的时间间隔为 Δt ，第 i 时刻像机的光心坐标 $C_i(X_{C_i}, Y_{C_i})$ 和测量定向线 C_iP_i 的方向角 α_i 均为已知。如图 10.3.1 所示，不失一般性，以第一个时刻为基准时刻，以该时刻的光心坐标 $C_1(X_{C_1}, Y_{C_1})$ 为基准点，该时刻目标位置为 $P_1(X_{P_1}, Y_{P_1})$ ，以基准点测量定向线 C_1P_1 为基准线。将其它时刻观察目标的视线 C_iP_i 沿目标轨迹平移到与 C_1P_1 相交于 P_i ，得到光心与目标的虚拟连线 C'_iP_i ，虚拟光心 $C'_i(X'_{C_i}, Y'_{C_i})$ 为平移后像机光心 C_i 的虚拟位置。

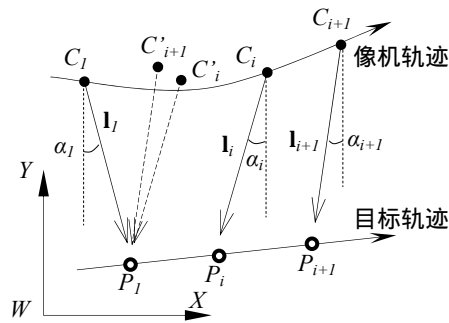


图 10.3.1 平移交会法示意图

根据图 10.3.1 中的几何关系，第 i 时刻光心与目标的虚拟连线 $C_i P_i$ 满足

$$X_{P_i} - X'_{C_i} = (Y_{P_i} - Y'_{C_i}) \tan \alpha_i \quad (10.3.1)$$

由于目标做速度为 (v_X, v_Y) 的匀速直线运动，因而

$$\begin{cases} X'_{C_i} = X_{C_i} - v_X (i-1) \Delta t \\ Y'_{C_i} = Y_{C_i} - v_Y (i-1) \Delta t \end{cases} \quad (10.3.2)$$

其中 Δt 为相邻图像间的时间间隔。将式(10.3.2)代入式(10.3.1)，整理得到关于 X_{P_i} 、 Y_{P_i} 和 v_X 、 v_Y 的线性方程：

$$X_{P_i} - \tan \alpha_i \cdot Y_{P_i} + \Delta t \cdot v_X - \tan \alpha_i \cdot \Delta t \cdot v_Y = X_{C_i} - \tan \alpha_i \cdot Y_{C_i} \quad (10.3.3)$$

选取 4 个以上时刻可以列出两个以上式(10.3.3)的关系，联立得到关于 X_{P_i} 、 Y_{P_i} 和 v_X 、 v_Y 的线性方程组并进行求解，也就确定了目标的运动参数。从而得到目标在第 i 时刻的位置为

$$\begin{cases} X_{P_i} = X_{P_1} + v_X (i-1) \Delta t \\ Y_{P_i} = Y_{P_1} + v_Y (i-1) \Delta t \end{cases} \quad (10.3.4)$$

根据以上分析，平移交会法的前提是：各个时刻的测量定向线不平行，即像机平台与目标的运动不能是同速同向的，两者必须在运动方向或速度大小上有较大的差别。

为了容易理解上述问题和方法，我们可以想象将坐标系建立在点目标上，并且将此目标坐标系的时间轴压缩到某一时刻，在点目标上观察像机在此坐标系中不同时刻的位置。当像机与目标之间有运动差时，包括运动的速度方向或大小不一致，则观察到像机平台是从不同的角度来拍照目标。当所形成的交会角度合适，并且像机的运动和目标的运动之间满足使问题有确定解的条件，就可以得到满足精度要求的目标的三维位置和速度结果。

显然，像机平台与目标在运动方向或速度大小上的差别越大，就越快、越容易使像机平台对目标有较大的交会角。为了进行高精度的测量，该交会角通常应满足常规摄像测量的三维交会的交会角要求。例如交会角通常应大于 30 度，而 60 度~120 度之间为较理想的交会角。如果像机与目标的运动是接近同速同向的，两者之间连线的角度变化不大，则无法形成良好的交会条件。

10.4 单目三维运动轨迹交会法

上述的轨迹参数空间搜索法和平移交会法都可以推广到三维情况。而对于目标做一

般的空间三维曲线运动，我们用时间的参数化公式来描述点目标的运动规律，提出将像机光心与运动目标的连线不是象传统摄像测量那样交会于同一点，而是交会于这条参数化轨迹曲线上，进而求解确定此条曲线的参数，从而确定目标的三维运动轨迹和速度、加速度。我们称这种交会概念为轨迹交会，这种测量方法为单目三维运动轨迹交会法。下面具体介绍该方法的原理和步骤。

10.4.1 成像关系

设第 i 时刻点目标在坐标系 W-XYZ 中的空间位置为 $P_i(X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi})$ ，修正像差后的成像点坐标为 $p_i(x_{Pi}, y_{Pi})$ 。像机内参数和像差系数已知，像机运动可控，因而像机坐标系 W-XYZ 中的外参数为已知，则可以确定成像投影矩阵 M_i 。根据第二章介绍的中心透视投影成像关系，有：

$$\lambda_i \begin{bmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ I \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} X_{Pi} \\ Y_{Pi} \\ Z_{Pi} \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{i,0} & m_{i,1} & m_{i,2} & m_{i,3} \\ m_{i,4} & m_{i,5} & m_{i,6} & m_{i,7} \\ m_{i,8} & m_{i,9} & m_{i,10} & m_{i,11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Pi} \\ Y_{Pi} \\ Z_{Pi} \\ I \end{bmatrix} \quad (10.4.1)$$

其中 λ_i 为 P_i 到像机光心的距离在像机光轴上的投影长度。将上式第三列分别除前两列，并整理得到：

$$\begin{bmatrix} x_{Pi}m_{i,8} - m_{i,0} & x_{Pi}m_{i,9} - m_{i,1} & x_{Pi}m_{i,10} - m_{i,2} \\ y_{Pi}m_{i,8} - m_{i,4} & y_{Pi}m_{i,9} - m_{i,5} & y_{Pi}m_{i,10} - m_{i,6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Pi} \\ Y_{Pi} \\ Z_{Pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{i,3} - x_{Pi}m_{i,11} \\ m_{i,7} - y_{Pi}m_{i,11} \end{bmatrix} \quad (10.4.2)$$

上式就是第 i 时刻观察目标的视线的方程，即共线方程，其中的投影矩阵参数、目标像点坐标为已知，目标点在这条直线上。

10.4.2 点目标运动的描述

我们用如下的时间的参数化多项式来描述点目标的运动，即目标在第 i 时刻 t_i 的位置坐标为：

$$\begin{cases} X_{Pi} = \sum_{k=0}^{n_x} a_k t_i^k \\ Y_{Pi} = \sum_{k=0}^{n_y} b_k t_i^k \\ Z_{Pi} = \sum_{k=0}^{n_z} c_k t_i^k \end{cases} \quad (10.4.3)$$

其中的系数 $a_k(k=0,1,\dots,n_x)$ 、 $b_k(k=0,1,\dots,n_y)$ 、 $c_k(k=0,1,\dots,n_z)$ 为待求解的描述目标运动的参数。通过适当选取多项式的次数，可以很好地用此参数方程描述目标的运动状态，例如取时间的 1 次或 2 次多项式可以分别描述目标作匀速运动或匀加速运动的情况。对大部分实际情况，在短时间内，通常取时间的 2 次或 3 次多项式就可以很好地描述目标运动状态。

10.4.3 三维轨迹曲线交会计算

式(10.4.2)和(10.4.3)分别给出了由测量定向线描述的成像关系和由时间的参数化方程描述的目标运动轨迹曲线。显然，每一时刻我们都已唯一确定了测量定向线，而这些连线与目标运动轨迹相交于点目标所在的空间位置。因此，在各个时刻，点目标的位置需要同时满足共线成像关系和运动规律约束。所以，将共线方程(10.4.2)与目标运动方程(10.4.3)联立求解，可以同时得到目标点的各个位置量和运动方程中的各个参数。求解过程如下。

将式(10.4.3)代入式(10.4.2)，得到：

$$\begin{bmatrix} x_{P_i}m_{i,8} - m_{i,0} & x_{P_i}m_{i,9} - m_{i,1} & x_{P_i}m_{i,10} - m_{i,2} \\ y_{P_i}m_{i,8} - m_{i,4} & y_{P_i}m_{i,9} - m_{i,5} & y_{P_i}m_{i,10} - m_{i,6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{n_x} a_k t_i^k \\ \sum_{k=0}^{n_y} b_k t_i^k \\ \sum_{k=0}^{n_z} c_k t_i^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{i,3} - x_{P_i}m_{i,11} \\ m_{i,7} - y_{P_i}m_{i,11} \end{bmatrix} \quad (10.4.4)$$

可将其改写为关于 $a_k(k=0,1,\dots,n_x)$ 、 $b_k(k=0,1,\dots,n_y)$ 、 $c_k(k=0,1,\dots,n_z)$ 的线性方程组：

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^{n_x} (x_{P_i}m_{i,8} - m_{i,0}) t_i^k a_k + \sum_{k=0}^{n_y} (x_{P_i}m_{i,9} - m_{i,1}) t_i^k b_k + \sum_{k=0}^{n_z} (x_{P_i}m_{i,10} - m_{i,2}) t_i^k c_k = m_{i,3} - x_{P_i}m_{i,11} \\ \sum_{k=0}^{n_x} (y_{P_i}m_{i,8} - m_{i,4}) t_i^k a_k + \sum_{k=0}^{n_y} (y_{P_i}m_{i,9} - m_{i,5}) t_i^k b_k + \sum_{k=0}^{n_z} (y_{P_i}m_{i,10} - m_{i,6}) t_i^k c_k = m_{i,7} - y_{P_i}m_{i,11} \end{cases} \quad (10.4.5)$$

这就是三维运动轨迹交会计算的基本方程。联立多个时刻的形如式(10.4.5)的关系式，求解线性方程组就得到目标运动轨迹时间多项式的系数 $a_k(k=0,1,\dots,n_x)$ 、 $b_k(k=0,1,\dots,n_y)$ 、 $c_k(k=0,1,\dots,n_z)$ 。代入式(10.4.3)，即得到点目标在各个时刻的空间三维位置结果 $(X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})$ 及其运动参数。

10.4.4 关于轨迹交会计算可解条件的讨论

在进行单目运动差对运动点目标定位求解时，每增加一个采图时刻，即增加一条测

量定向线,就增加了如式(10.4.5)的两个基本方程。由n条测量定向线可以得到2n个基本方程。而需要测量的运动点目标在各个时刻的位置有3n个未知数 (X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi}) , $i=1, \dots, n$ 。因此未知数的数目总是大于方程的数目,这就是常规摄像测量无法单目求解点目标运动参数的原因。

但是我们已规定目标的运动满足式(10.4.3)的关于时间的多项式,形成了对目标空间位置的约束,通过求解描述该多项式的系数,就确定了目标的运动参数,从而得到目标在各个时刻的空间位置。这一求解过程中,未知数的数目为 $(n_X+n_Y+n_Z+3)$,其中 n_X 、 n_Y 、 n_Z 分别为目标位置坐标分量 X_{Pi} 、 Y_{Pi} 、 Z_{Pi} 所满足的时间多项式的次数。如果采图次数n满足 $2n \geq (n_X+n_Y+n_Z+3)$,并且联立式(10.4.5)得到的线性方程组系数矩阵的秩等于 $(n_X+n_Y+n_Z+3)$,就可以求解线性方程组,确定目标的三维运动轨迹,并进而计算目标的速度、加速度等运动参数。

当像机运动平台连续拍照得到序列图像时,测量点或定向线的数量可以大大超过最小数量要求。此时并不需要各个时刻的数据都参加解算,而且由于相邻时刻定向线接近平行,交会条件差,可能会使求解运算不稳定,给测量结果带来较大误差。因此要求对序列图像做关键帧选取,判别两幅相邻图像的定向线间具有良好的交会角时,才选为关键帧,参加三维曲线交会计算。当两幅相邻图像的定向线不满足一定交会角时,应舍掉该图像,换后续图像进行判别,直到满足条件。如果在给定的时间段内,没有足够的关键帧,则应该减小关键帧交会角选择的阈值,但这会以降低最终的曲线交会测量精度为代价。所有的定向线整体上应有较大的交会角,但也不能大到接近180度,否则也会影响交会计算精度,并且相邻定向线间的交会角应较均匀分布。

进行足够多次采图,使方程数目等于或多于未知数的数目,只是本问题有确定解的必要条件。要确定目标的运动参数,还需对像机和目标的运动有一定要求。在某些情况下,即使采图时刻足够多,但由于方程组系数矩阵的秩小于未知数的数目,使得方程组奇异,也无法确定目标的真实运动参数。下面讨论两种这样的情况。

1) 如果像机运动也能用时间的多项式描述,并且描述像机运动的时间多项式的次数等于或低于描述目标运动的时间多项式的次数,则无法确定目标的运动参数。

设像机的运动轨迹可用时间的多项式描述为

$$\begin{cases} X_{Ci} = \sum_{k=0}^{n_{CX}} a_{Ck} t_i^k \\ Y_{Ci} = \sum_{k=0}^{n_{CY}} b_{Ck} t_i^k \\ Z_{Ci} = \sum_{k=0}^{n_{CZ}} c_{Ck} t_i^k \end{cases} \quad (10.4.6)$$

描述目标的运动轨迹的时间多项式为(10.4.3)。其中 $n_{CX} \leq n_X$ 、 $n_{CY} \leq n_Y$ 、 $n_{CZ} \leq n_Z$ 。设 t_i 时刻测量定向线的方向矢量为 $[l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}]^T$ ， $i=1, \dots, n$ 。像机光心 C_i 和目标 P_i 都在该直线上，因而：

$$\begin{cases} X_{Pi} = \sum_{k=0}^{n_X} a_k t_i^k = X_{Ci} + \lambda_i l_{i1} = \sum_{k=0}^{n_{CX}} a_{Ck} t_i^k + \lambda_i l_{i1} \\ Y_{Pi} = \sum_{k=0}^{n_Y} b_k t_i^k = Y_{Ci} + \lambda_i l_{i2} = \sum_{k=0}^{n_{CY}} b_{Ck} t_i^k + \lambda_i l_{i2} \\ Z_{Pi} = \sum_{k=0}^{n_Z} c_k t_i^k = Z_{Ci} + \lambda_i l_{i3} = \sum_{k=0}^{n_{CZ}} c_{Ck} t_i^k + \lambda_i l_{i3} \end{cases} \quad (10.4.7)$$

由第三式得到系数 λ_i ：

$$\lambda_i = \left(\sum_{k=0}^{n_Z} c_k t_i^k - \sum_{k=0}^{n_{CZ}} c_{Ck} t_i^k \right) / l_{i3} \quad (10.4.8)$$

将其代入式(10.4.7)的前两式，并整理得到

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^{n_X} a_k t_i^k - \frac{l_{i1}}{l_{i3}} \sum_{k=0}^{n_Z} c_k t_i^k = \sum_{k=0}^{n_{CX}} a_{Ck} t_i^k - \frac{l_{i1}}{l_{i3}} \sum_{k=0}^{n_{CZ}} c_{Ck} t_i^k \\ \sum_{k=0}^{n_Y} b_k t_i^k - \frac{l_{i2}}{l_{i3}} \sum_{k=0}^{n_Z} c_k t_i^k = \sum_{k=0}^{n_{CY}} b_{Ck} t_i^k - \frac{l_{i2}}{l_{i3}} \sum_{k=0}^{n_{CZ}} c_{Ck} t_i^k \end{cases} \quad (10.4.9)$$

这是关于 $a_k(k=0,1,\dots,n_X)$ 、 $b_k(k=0,1,\dots,n_Y)$ 、 $c_k(k=0,1,\dots,n_Z)$ 的线性方程组，也就是像机运动用时间多项式描述时轨迹曲线交会的计算的基本方程。可见，由于 $n_{CX} \leq n_X$ 、 $n_{CY} \leq n_Y$ 、 $n_{CZ} \leq n_Z$ ，除了真实目标轨迹，使方程等号两侧对应的时间各次项的系数相等的下式也是基本方程的解：

$$\begin{cases} k < n_{CX} \text{ 时: } a_k = a_{Ck}; & k > n_{CX} \text{ 时: } a_k = 0 \\ k < n_{CY} \text{ 时: } b_k = b_{Ck}; & k > n_{CY} \text{ 时: } b_k = 0 \\ k < n_{CZ} \text{ 时: } c_k = c_{Ck}; & k > n_{CZ} \text{ 时: } c_k = 0 \end{cases} \quad (10.4.10)$$

即除了目标的真实运动轨迹，由于像机轨迹是次数更低的时间多项式，自然也满足

对目标轨迹的时间多项式约束，因而也是满足基本方程的一组解。这表明，即使采图次数满足使基本方程的数目等于或多于未知数数目，但基本方程系数矩阵的秩小于未知数数目，基本方程有无穷多组解，如果不附加更多的约束条件，则无法确定目标的真实运动轨迹。

2) 如果所有测量定向线相交于同一点，则无法确定目标的运动参数。

设描述目标运动轨迹的时间多项式为式(10.4.3)， t_i 时刻测量定向线 \mathbf{l}_i 的方向矢量为 $[l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}]^T$ ， $i=1, \dots, n$ ，各时刻的测量定向线 \mathbf{l}_i 都通过点 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 。由于 P_0 和目标 P_i 都在直线 \mathbf{l}_i 上，因而：

$$\begin{cases} X_{P_i} = \sum_{k=0}^{n_x} a_k t_i^k = X_0 + \lambda_i l_{i1} \\ Y_{P_i} = \sum_{k=0}^{n_y} b_k t_i^k = Y_0 + \lambda_i l_{i2} \\ Z_{P_i} = \sum_{k=0}^{n_z} c_k t_i^k = Z_0 + \lambda_i l_{i3} \end{cases} \quad (10.4.11)$$

对于任意不为零的常数 d ，可以得到另一组在每一时刻落在对应测量定向线上的空间位置坐标：

$$\begin{cases} X'_{P_i} = X_0 + d \lambda_i l_{i1} \\ Y'_{P_i} = Y_0 + d \lambda_i l_{i2} \\ Z'_{P_i} = Z_0 + d \lambda_i l_{i3} \end{cases} \quad (10.4.12)$$

从式(10.4.11)可以得到

$$\begin{cases} \lambda_i l_{i1} = \sum_{k=0}^{n_x} a_k t_i^k - X_0 \\ \lambda_i l_{i2} = \sum_{k=0}^{n_y} b_k t_i^k - Y_0 \\ \lambda_i l_{i3} = \sum_{k=0}^{n_z} c_k t_i^k - Z_0 \end{cases} \quad (10.4.13)$$

将其代入式(10.4.12)，得到

$$\begin{cases} X'_{P_i} = X_0 + d \left(\sum_{k=0}^{n_x} a_k t_i^k - X_0 \right) = \sum_{k=0}^{n_x} da_k t_i^k + (1-d) X_0 \\ Y'_{P_i} = Y_0 + d \left(\sum_{k=0}^{n_y} b_k t_i^k - Y_0 \right) = \sum_{k=0}^{n_y} db_k t_i^k + (1-d) Y_0 \\ Z'_{P_i} = Z_0 + d \left(\sum_{k=0}^{n_z} c_k t_i^k - Z_0 \right) = \sum_{k=0}^{n_z} dc_k t_i^k + (1-d) Z_0 \end{cases} \quad (10.4.14)$$

可见，这也满足目标轨迹 X 、 Y 、 Z 分量分别为时间 t 的 n_x 、 n_y 、 n_z 次多项式的约束。即 $(X'_{P_i}, Y'_{P_i}, Z'_{P_i})$ 既在测量定向线上，满足成像关系约束，同时又满足目标运动规律约束，因而也是基本方程的解。由于不为零的常数 d 是任意取的，因而基本方程有无穷多组解，在没有更多约束条件时，无法确定目标的真实运动轨迹。这可以由图10.4.1直观地解释，当所有测量定向线 l_i 交于同一点 P_0 时，只要 l_i 上的点 P'_i 与目标的真实位置 P_i 分别到 P_0 的距离之比在各条定向线上一致，即 $|P'_i P_0|/|P_i P_0| = \text{常数}$ ，则 P'_i 所描出的轨迹与真实轨迹形状相似，都满足同一形式的时间多项式，因而无法确定真实轨迹。

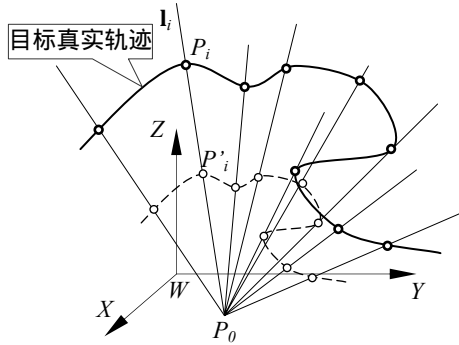


图 10.4.1 测量定向线交于同一点无法确定目标轨迹

由于一组平行直线相交于无穷远点，因而当所有测量定向线相互平行时，是上述所有测量定向线相交于同一点的特例，同样无法确定目标的运动参数。

10.5 验证实验

10.5.1 数字仿真实验

设定一组时刻以及各时刻像机参数和点目标的运动轨迹，采用单目运动轨迹交会解算目标空间位置，与仿真条件设定的理论值进行比对。

仿真像机主点(512, 512)，等效焦距(1000, 1000)，设定各时刻像机在世界坐标系中的位置姿态参数。设目标点的运动轨迹用时间的多项式描述为

$$\begin{cases} X(t) = -500 - 600t - 100t^2 + 10t^3 + 10t^4 \\ Y(t) = 1200 + 610t + 100t^2 - 10t^3 + 10t^4 \\ Z(t) = 1000 + 100t + 50t^2 + 20t^3 + 5t^4 \end{cases} \quad (10.5.1)$$

取 10 个时刻的数据，各时刻像机在世界坐标系中的位置姿态参数，根据目标轨迹多项式计算的目标在世界坐标系中的位置坐标如表 10.5.1，像机与目标相距 2000mm 左右。

表 10.5.1 单目运动轨迹交会法数字仿真实验参数

时刻 (秒)	像机位置姿态参数						目标位置坐标		
	$T_x(\text{mm})$	$T_y(\text{mm})$	$T_z(\text{mm})$	$A_x(^{\circ})$	$A_y(^{\circ})$	$A_z(^{\circ})$	$X(\text{mm})$	$Y(\text{mm})$	$Z(\text{mm})$
0.3	500	1000	2000	180.0	6.9	4.0	-689	1392	1035
0.4	500	1100	2000	-176.7	1.2	2.3	-755	1460	1049
0.5	600	1300	2050	-179.0	-0.6	-0.6	-823	1529	1065
0.6	600	1350	2000	177.6	0.0	-3.4	-893	1601	1083
0.7	700	1400	2100	174.8	-2.9	-2.3	-963	1675	1103
0.8	700	1500	2200	178.2	4.6	0.0	-1035	1751	1124
0.9	800	1500	2000	-177.8	34.4	1.7	-1107	1829	1148
1.0	600	1700	1900	-168.1	53.3	5.7	-1180	1910	1175
1.1	700	1800	1900	-168.6	47.0	4.0	-1253	1993	1204
1.2	600	2000	2000	-165.2	-2.3	1.7	-1326	2079	1237

分别给像点加入均方差为 0.1、0.2、0.5、1.0 像素的提取误差，用单目运动轨迹交会法解算目标位置，重复多次实验，解算结果均方误差如表 10.5.2。

表 10.5.2 单目运动轨迹交会法数字仿真实验结果均方误差

像点提取均方误差 (像素)	目标位置解算结果均方误差		
	X 坐标分量(mm)	Y 坐标分量(mm)	Z 坐标分量(mm)
0.1	0.7	0.5	1.0
0.2	1.3	0.9	2.7
0.5	5.3	2.5	6.0
1.0	9.7	6.1	16.2

另外，我们通过数字仿真实验研究了目标定位误差与参加计算的目标运动历时、观察目标的视线方向角均方误差、像机光心位置均方误差的关系。一组仿真实验结果曲线如图 10.5.1(a)和(b)。

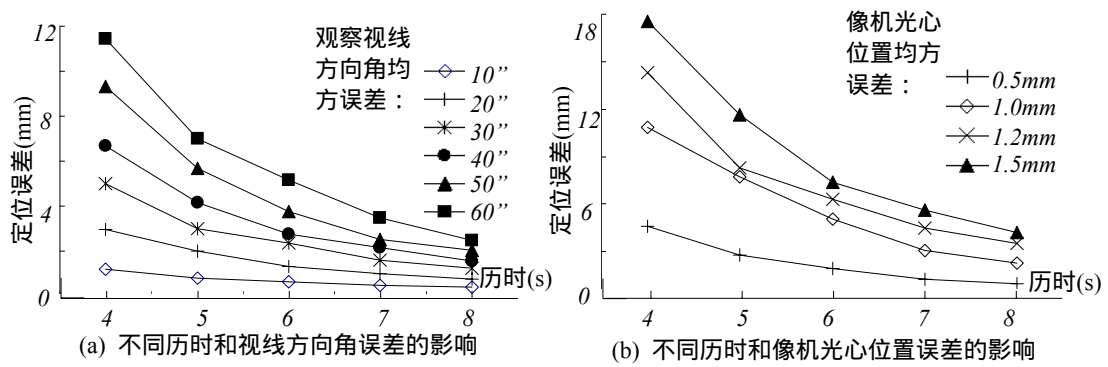


图 10.5.1 定位误差与观察视线方向角、像机光心位置误差和目标运动历时的关系

可见，计算时采用的目标运动历时越长，则定位精度越高。但实际应用中，历时加长后会影响到目标实际运动轨迹与其时间多项式描述的符合程度。并且如 10.4 节所述，定位解算效果与测量定向线之间的交会角度等有密切关系。

10.5.2 实物实验

实物实验装置如图 10.5.2，像机和目标各安装在一部转台上。两部移动转台分别控制像机和目标的运动，同时像机采集目标的序列图像。像机内参数和像差系数已标定，各个采图时刻像机的外参数以及目标的运动参数由转台的运动控制机构给出。采用单目运动轨迹交会法解算各时刻目标的三维运动轨迹和速度。实验中，目标运动最大行程约为 400mm，像机和目标相距约 2 米

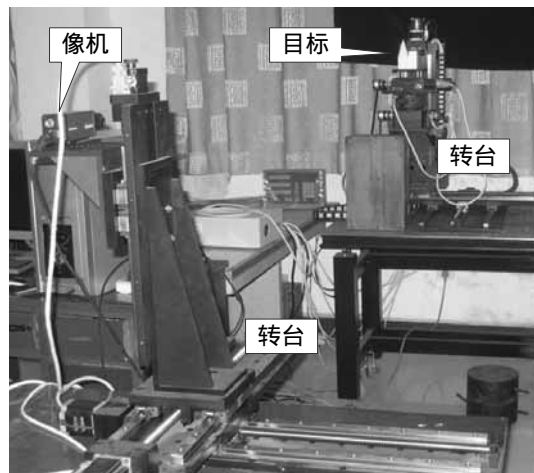


图 10.5.2 单目运动轨迹交会法实物实验场景

将单目运动轨迹交会法测量结果与目标运动参数真值进行比对，并对多次实验结果进行统计。目标位置测量结果误差均方差为 3.7mm，目标运动速度测量结果误差均方差为 0.70mm/s。可以通过提高像机参数标定和目标提取精度，以及优化设计像机运动轨迹

进一步提高测量精度。

本章提出并实现了一种机动平台单目对任意运动点目标进行定位测速的新概念方法：单目运动轨迹交会法。该方法突破了传统摄像测量中运动平台单目无法测量运动点目标的三维运动的限制，使摄像测量扩展了一大类应用范围。该方法不需增加辅助设备，不需目标结构等先验知识，在单目测量运动点目标方面有较好的应用前景。

参考文献

- [1] Arras K.O., Tomatis N. Improving robustness and precision in mobile robot localization by using laser range finding and monocular vision[J]. *Advanced Mobile Robots*, 1999: 177-185
- [2] Arras K.O., Tomatis N. Siegwart, R. Multisensor on-the-fly localization using laser and vision. *Intelligent Robots and Systems*[C]. *IEEE Proceedings of IROS 2000*(1): 462-467.
- [3] Zhuang Yan, Xu Xiaodong, Pan Xuejun, Wang Wei. Mobile robot indoor navigation using laser range finder and monocular vision. *Robotics*[J], *Intelligent Systems and Signal Processing*, 2003(1): 77-82.
- [4] C. C. Liebe, C. Padgett, J. Chang. Three dimensional imaging utilizing structured light[C]. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference 2004*:2647-2655.
- [5] R. Sablatnig, S. Tosovic, M. Kampel. Combining shape from silhouette and shape from structured light for volume estimation of archaeological vessels[C]. *Proceeding of 16th International Conference on Pattern Recognition*. 2002: 364-367.
- [6] A. P. Pentland. A new sense for depth of field[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 9(4):523-531.
- [7] M. Subbaro, G. Surya. Depth from defocus: a spatial domain approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(3):271-294.
- [8] G. Schneider, B. Heit, J. Honig, J. Bremont. Monocular depth perception by evaluation of the blur in defocused images[C]. *IEEE International Conference Image Processing*. 1994:116-119
- [9] 郑元杰, 杨杰. 基于单摄像头双目成像系统在计算机视觉中的应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4):392-396.
- [10] 郝继贵, 李艳军, 叶声华, 唐大林, 张国全. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(7):943-948.
- [11] 殷世民, 付小宁, 刘上乾. 红外单站被动定位技术速度更新算法研究[J]. *光子学报*, 2003, 32(3): 298-300.
- [12] 张小虎, 邱慧, 周剑, 尚洋, 李立春, 于起峰. 一种单像机对运动目标定位的新方法[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(5):114-118.

第十一章 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法

光学和电磁学的干涉条纹图测量技术是测量领域最重要的方法和技术之一，它以测量精度高著称。作为从事测量工作的人员应该至少要了解它，虽然它与摄像测量之间的关系是模糊的。作者在干涉条纹图处理分析中从事了 20 年多年的研究工作。为了对我们的研究成果进行较完整的总结，和使读者对测量方法技术有较完整地了解，本章简要总结介绍作者在干涉条纹图处理分析中的一系列研究成果，特别是在光学中的电子散斑干涉测量技术（Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI）和电磁学中的合成孔径雷达干涉测量技术（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）中的研究成果。这也是作者的专著《基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法》内容的简要介绍⁰。

ESPI 和 InSAR 是两种既相似又互相区别的测量手段，是国际上快速发展的新型干涉测量技术。虽然两者的信号来源、性质、物理意义等都有很大的不同，但又存在许多相似之处，具有一些核心的共性。两者的表现形式都是由随机散斑信号场干涉形成的含高强度散斑噪声的干涉条纹图，并最终从条纹图中提取待求相位信息。所不同的是 ESPI 记录的是随机散斑场的强度信号，而 InSAR 记录的是随机散斑场的带有相位的复数信号。因此它们基本干涉方法不同，ESPI 通常采用相减模式，InSAR 采用共轭相乘模式来生成干涉条纹图。这两种方法都保留了大量的散斑噪声，这里主要指短波段的 InSAR，这些斑点噪声是 ESPI 和 InSAR 数据处理中的共同的最主要困难之一。

本章主要介绍利用条纹方向信息，在条纹切线上或等值线上进行低通滤波，可高效滤除噪声，同时保持条纹信息不受损害的系列旋滤波与等值线滤波方法，和分别用于 ESPI 和 InSAR 的生成无斑点噪声、无相位畸变的干涉条纹图的等值线相关干涉法。

11.1 系列旋滤波、等值线窗口滤波理论与方法

针对云纹、全息、散斑、InSAR 等干涉条纹图的相位与噪声频谱混叠的难点，作者提出了对任意干涉条纹图利用条纹方向信息、在条纹等值线或切线方向上进行处理的思路和概念，提出和发展了能滤除各种噪声并保持条纹相位不受损害的理论及系列旋滤波法、系列等值线窗口滤波方法。这些方法解决了以往各种滤波方法在滤掉高频噪声的同时不可避免地模糊、畸变条纹相位的难题。

11.1.1 滤波

各种干涉条纹图中的相位场为余弦调制，图像中 useful 信息的频率分布于包括高频的较宽的频带上。而噪声属于高频信号，因此在条纹图像的频谱中，相位信号的频谱与噪声通常叠加在一起，无法清晰分开，如 **错误！未找到引用源。** 所示。如果将滤除高频噪声的低通滤波器的截止频率设得较低，则会在滤除高频噪声的同时，损伤部分条纹信号；而如果为了不损伤条纹信号而将门限设高，又会无法有效地消除噪声。这种实际情况给滤除条纹图的噪声带来了很大的困难。通常的滤波方法，如均值滤波和中值滤波，在滤掉噪声的同时，往往会模糊条纹，甚至使条纹特征产生畸变。

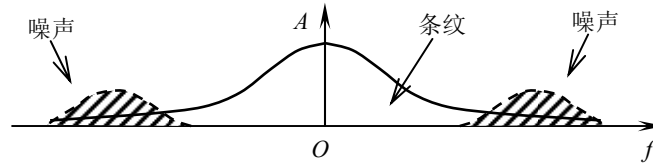


图 11.1.1 条纹信号频谱图

实际上，条纹图的灰度分布有明显的规律：在条纹的法线方向上，灰度分布变化最大，而在条纹的切线方向上，灰度分布变化最小，如 **错误！未找到引用源。** 所示。下面在频域内分析此规律。**错误！未找到引用源。** (a)、(b) 分别是条纹图中某一窗口内在条纹法线和切线方向的灰度分布，(c)、(d) 分别是(a)、(b)的频谱分布图。在条纹法线方向，灰度变化较大，对应的频谱呈一条宽带，条纹信号与噪声的频谱是叠加在一起的，无法截然分开。

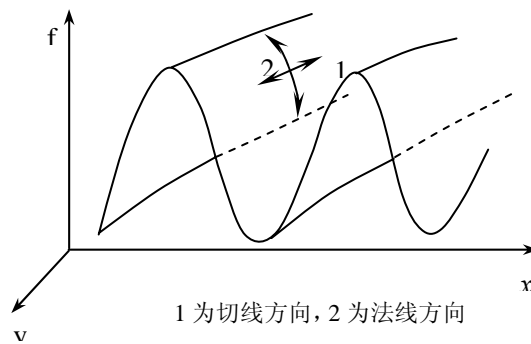


图 11.1.2 条纹图上的灰度分布

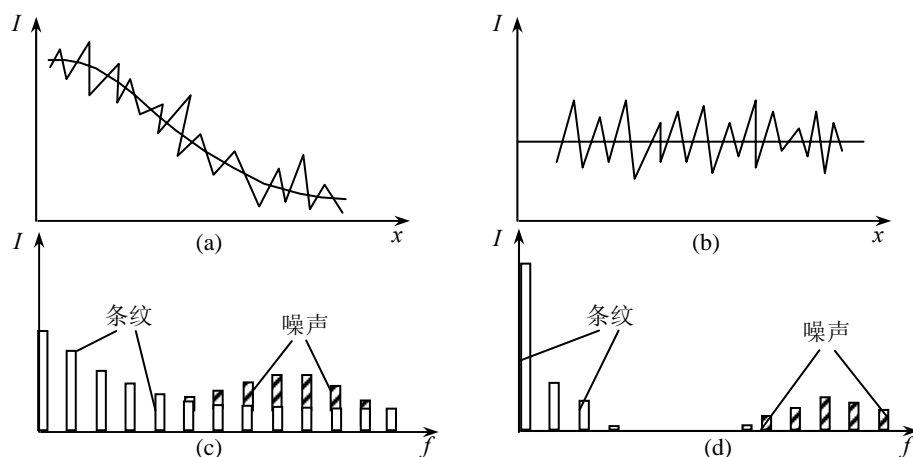


图 11.1.3 在法线方向和切线方向的条纹空域及频域分布图

而在条纹切线方向，灰度变化很小，近似为常数，对应的频谱是在零频附近的一条窄带，而随机噪声仍然分布在高频段。因此对这种情况使用常规的低通滤波器，如中值滤波或均值滤波，就可将零频的条纹与高频的噪声频谱清晰地分离开，从而既滤除掉噪声，同时又不损害条纹信号的任何信息。

多数干涉条纹图的光强（灰度）分布可用数学形式表达为：

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos \phi(x, y) + I_n(x, y) \quad (11.1.1)$$

其中 $I(x, y)$ 是条纹灰度值， $I_0(x, y)$ 为背景分布， $I_1(x, y)$ 为条纹幅值或对比度， $\phi(x, y)$ 为相位场， $I_n(x, y)$ 为加性随机噪声。以均值低通滤波为例，上述条纹图在条纹等值线上的滤波过程为

$$\begin{aligned} \langle I(x, y) \rangle &= \langle I_0(x, y) \rangle + \langle I_1(x, y) \rangle \cdot \langle \cos \phi(x, y) \rangle + \langle I_n(x, y) \rangle \\ &= \bar{I}_0 + \bar{I}_1 \cdot \cos \phi(x, y) \end{aligned} \quad (11.1.2)$$

其中， $\bar{I}_0 = \langle I_0(x, y) \rangle$ ， $\bar{I}_1 = \langle I_1(x, y) \rangle$ ， $\langle \cdot \rangle$ 代表在滤波窗口内对变量求均值。在上述推导过程中，使用了 $\langle \cos \phi(x, y) \rangle = \cos \phi(x, y)$ 这一重要条件，它只有在 $\phi(x, y)$ 为常数时，即在条纹等值线上是严格成立的。若滤波窗口为矩形窗口，这一条件就会偏差很大，进而滤波会模糊条纹信息。利用同样原理，对带有相乘性噪声的条纹图滤波也可得到相同的结论。

根据上述思想，提出旋滤波原理：在图像任一当前点的一个窗口上，作八或十六条等角平分线。计算各条线上灰度均方差，定义灰度均方差最小的方向线为条纹的切线方向，用此条纹切线近似条纹等值线。然后在此切线方向上作用一维的均值滤波或中值滤

波。对条纹图每一点重复上述过程即完成旋滤波。进一步提出了多种类型的旋滤波，如双臂旋滤波、单臂旋滤波、二值旋滤波、适应于锯齿形相位图的旋滤波等。

大量应用证明，旋滤波能有效地消除干涉条纹图的随机噪声，更重要的是对条纹图不产生模糊畸变效应。对于高密度条纹图，这种特点更为明显。旋滤波或等值线滤波已成为国际上干涉条纹图的常规滤波方法。

错误！未找到引用源。(a)是一幅周边固支、中心加载的全息条纹图，(b)是(a)经过均值滤波后的结果图；(c)是(a)经过旋滤波后的结果图。**错误！未找到引用源。**(a)、(b)、(c)分别是**错误！未找到引用源。**(a)、(b)、(c)中同一截面的灰度分布曲线图。从**错误！未找到引用源。**(b)和**错误！未找到引用源。**(b)可以看出，均值滤波对条纹有明显的模糊效应，在中心区的高密度条纹区域，条纹特征已被明显破坏。而从**错误！未找到引用源。**(c)和**错误！未找到引用源。**(c)看到，旋滤波对条纹没有明显的模糊效应，既滤掉了噪声，又保持了条纹特征。

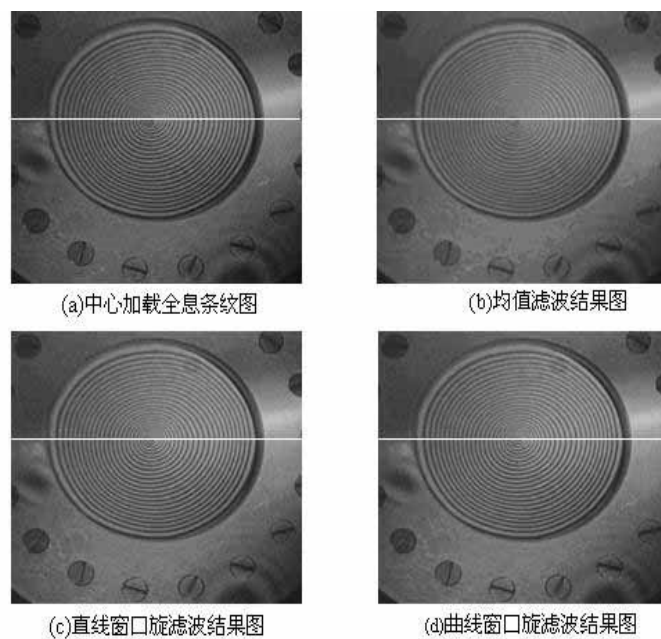


图 11.1.4 不同滤波算法结果比较图

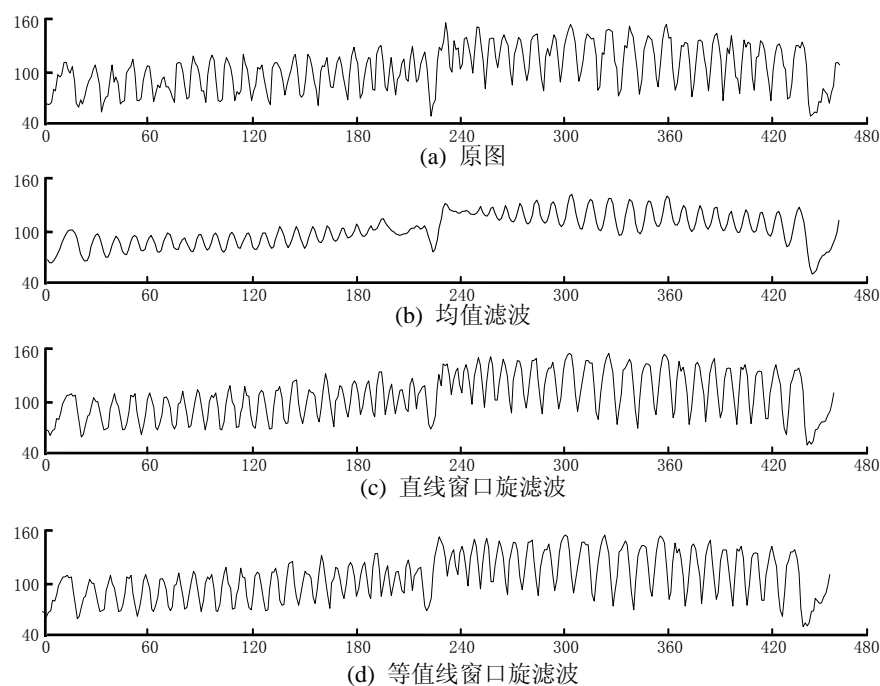


图 11.1.5 同一截面各种滤波前后的灰度分布图

11.1.2 等值线（曲线、曲面）滤波

当条纹曲率较大，或噪声水平较高，必须使用较大的滤波窗口时，上述旋滤波的直线窗口不能很好地近似大曲率或大尺寸的弯曲条纹等值线。此时，在滤波窗口上信号是常数的假设会有较大误差，旋滤波仍可能会损伤条纹信息，出现模糊效应。

针对这种情况，我们对上述直线旋滤波改进，提出了更符合实际情况的等值线窗口滤波（Contoured Window Filter, CWF），早期我们称之为曲线（曲面）窗口旋滤波（Spin Filter with Curved Windows, Spin Filter with Curved Surface Windows）错误！未找到引用源。。等值线窗口滤波的名字更为严格、准确。

条纹等值线窗口是一种等相位窗口，实际就是分数级条纹线。它是沿条纹图的条纹走向取一定长度和宽度所形成的曲线窗口，实际中可以利用条纹方向图进行逐点积分等方法得到。等值线窗口的确定是实现等值线滤波的关键，我们提出了多种提取条纹方向信息的方法，以及从条纹方向信息中建立高精度条纹等值线窗口的方法，为等值线滤波和等值线相关干涉法提供了基础。由于篇幅所限，有关条纹方向图的定义、求取方法、条纹等值线窗口建立方法等内容不再赘述，可参见相关文献⁰。

获得条纹等值线窗口后，在此窗口内对条纹图进行均值滤波。由于此窗口是条纹等值线，窗口上的条纹信号近似为常数，即信号是零频附近的，而噪声是高频的。因此在

此等值曲线窗口进行滤波可以高效消除噪声，同时对条纹结构信号没有损害。

为用等值线窗口对散斑条纹图滤波的结果图。用此等值线窗口滤波对**错误！未找到引用源。**(a)进行滤波，得到比**错误！未找到引用源。**(c)质量更好的结果，如**错误！未找到引用源。**(d)所示。**错误！未找到引用源。**(d)是此结果图与**错误！未找到引用源。**(a)同一截面的灰度分布图。比较**错误！未找到引用源。**(c)、(d)可得，等值线滤波比直线窗口滤波能更好的滤除噪声，并保持条纹的结构特性。

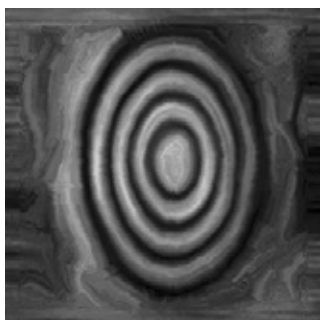


图 11.1.6 用等值线窗口对散斑图滤波的结果

11.1.3 自适应等值线滤波

上述等值线滤波方法的窗口尺寸是固定不变的，当条纹图的条纹密度变化较大时，等值线滤波效果会受到影响。对于较宽的条纹，较大的窗口能更好地滤除噪声；对于较细的条纹，则较小的窗口能更好地保持条纹信息。这就要求滤波窗口尺寸能根据条纹密度有自适应确定能力，以达到最优的效果。特别是对 ESPI 和 InSAR 干涉条纹图滤波时，由于噪声高和条纹密度、曲率变化大，窗口尺寸的自适应确定能力更为重要。因此，需要对条纹密度进行估计。

针对光学干涉条纹图和 InSAR 相位图的不同特点，我们提出了不同的条纹密度估计方法。对光学干涉条纹图可以采用累积灰度差法和利用条纹方向和条纹中心线估计条纹密度的方法^[9]；对 InSAR 相位图可以采用基于二值化条纹图的条纹密度估计方法和基于梯度的条纹密度估计方法^[10]。我们提出的这种自适应窗口等值线滤波，从理论上解决了 InSAR 相位图的传统滤波方法会损伤相位的难题。它的滤波效果比目前国际上广泛使用的 Lee 滤波的结果要好，特别是对曲率大的条纹情况这种优势更为明显。

11.2 ESPI 和 InSAR 数据处理中的系列等值线相关干涉法(CCI 法)

利用条纹等值线特性和 ESPI 和 InSAR 的散斑条纹场统计特性，我们提出了等值线相关干涉法 (Contoured Correlation Interferometry, CCI)，这是光学和雷达信号处理中的一

种新型干涉处理方法。与传统的利用 ESPI 两幅图相减法和 InSAR 的两复数图像共轭相乘法所生成的含高强度散斑噪声的相位条纹图相比，CCI 法能够直接给出无散斑噪声、高质量的干涉条纹（相位）图，解决了这两个领域中散斑噪声劣化相位场的质量和精度的难题，使得最终的相位展开（解缠）处理难度明显降低，并且放宽了对原始数据图像幅度的限制，有效提高了 InSAR 和 ESPI 的实用性和测量精度。

11.2.1 电子散斑干涉条纹图的 CCI 生成方法^[11,12]

传统常用的电子散斑条纹图生成方式是相减模式，其生成过程用以下公式描述：

物体变形前采集一幅原始散斑场：

$$f_1(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \beta \quad (11.2.1)$$

I_1 、 I_2 为相干光的光强， β 为随机相位。物体变形后再采集一幅原始散斑场：

$$f_2(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\beta + \Delta\phi) \quad (11.2.2)$$

$\Delta\phi$ 为物体变形引起的相位变化量，即要测的物理量。将以上两幅原始散斑场相减求平方生成干涉条纹图：

$$\begin{aligned} I_{sub} &= (f_1(x, y) - f_2(x, y))^2 \\ &= 4I_1 I_2 \sin^2(\beta + \Delta\phi/2) \cdot \sin^2(\Delta\phi/2) \\ &= 2I_1 I_2 \sin^2(\beta + \Delta\phi/2) \cdot (1 - \cos \Delta\phi) \end{aligned} \quad (11.2.3)$$

上式表示，该模式生成的条纹图包含有乘性噪声项 $\sin^2(\beta + \Delta\phi/2)$ 。并且其频谱和条纹信息的频谱叠加在一起，甚至此散斑干涉图的信噪比接近于 1，以至于许多学者甚至提出质疑：“散斑条纹图到底是信号还是噪声？”散斑条纹图的高噪声水平特性，使得高可靠、高精度地处理散斑条纹图变得极为困难，限制了散斑干涉法的工程应用。

从干涉原理中我们知道，干涉条纹图反映了两个相位场的相关性。因此有研究者提出了相关模式生成散斑条纹图的方法：对数字散斑图像中的任意一个 $m \times n$ 像素的矩形窗口，计算变形前后混合散斑场的纯相关系数，用此相关系数生成不含有乘性噪声的、亮度分布均匀的条纹图。但在该方法的公式推导中采用了近似条件，仅得到近似的结果。这些结果中有效地抑制了高频散斑噪声，但是却导致出现明显的大斑块噪声和严重模糊现象，有时对后续处理造成更大困难。因此，该方法缺乏实用价值。

下面简要说明相关模式生成条纹图的过程。标准化协方差相关公式为

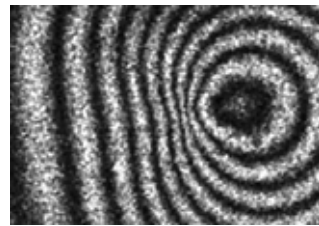
$$C(x, y) = \frac{\langle (f_1 - \langle f_1 \rangle_{m \times n})(f_2 - \langle f_2 \rangle_{m \times n}) \rangle_{m \times n}}{\left[\langle (f_1 - \langle f_1 \rangle_{m \times n})^2 \rangle_{m \times n} \right]^{1/2} \left[\langle (f_2 - \langle f_2 \rangle_{m \times n})^2 \rangle_{m \times n} \right]^{1/2}} \quad (11.2.4)$$

把公式**错误！未找到引用源。**、**错误！未找到引用源。**的原始散斑场代入上式，推导出相关系数与变形相位的关系：

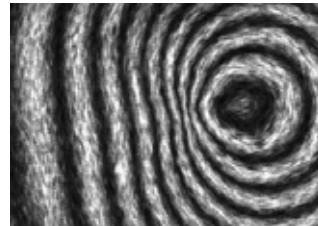
$$C \approx \frac{2 \langle I \rangle_{m \times n}^2 + 2 \langle I \rangle_{m \times n}^2 \cos \Delta \phi}{4 \langle I \rangle_{m \times n}^2} \approx (\cos \Delta \phi + 1) / 2 \quad (11.2.5)$$

在上述推导中要用到两个重要条件：一是相关计算窗口 $m \times n$ 内要有足够多的像素点数，二是相位变化量 $\Delta \phi$ 在 $m \times n$ 像素窗口内保持不变。对于矩形窗口来讲，第二个条件显然不能满足，只是近似成立，所以公式**错误！未找到引用源。**中用“ \approx ”而未用“ $=$ ”。

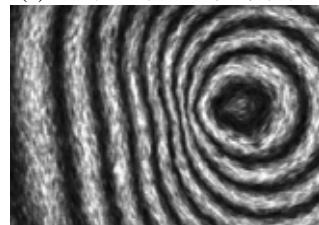
错误！未找到引用源。、(c)、(e)分别是用 7×7 、 13×13 、 19×19 矩形窗口用相关模式生成的干涉条纹图，可以看出，当相关窗口较小时，相关干涉条纹细节保持较好，但颗粒噪声尺度变大，强度更大；当窗口取大时，小颗粒噪声被较好地抑制，但出现了大的斑块噪声，这种斑块噪声有时更难处理；且条纹细节，特别是对较密的条纹，模糊效应严重。对减模式得到的传统条纹图尚有一些成功的处理方法，但对上述方法得到的条纹图无论是灰度方法还是中心线法都难以处理好。所以这种条纹图基本没有实用价值。



(a) 7×7 矩形窗口相关条纹图



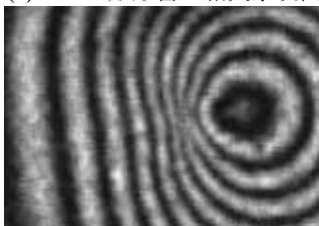
(b) 15×3 的 CCI 条纹图



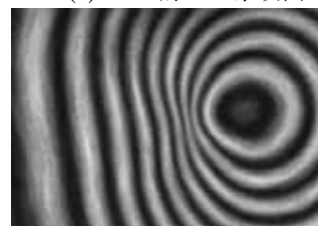
(c) 13×13 矩形窗口相关条纹图



(d) 55×3 的 CCI 条纹图



(e) 19×19 矩形窗口相关条纹图



(f) 67×5 的 CCI 条纹图

图 11.2.1 矩形窗口相关相关条纹图与 CCI 条纹图效果比较

分析造成上述结果有如下原因：1) 相关窗口较小时，公式推导中的散斑统计理论的部分关系式不成立，会产生较大误差。2) 公式推导中有一个非常重要的假设：假定相位变化量 $\Delta\phi$ 在 $m \times n$ 像素区域内保持不变。相关窗口较大时，这一假设显然不成立。因此，矩形窗口相关模式生成的散斑干涉图，无论所用的窗口尺寸大或小，都不能满足相关干涉的基本条件，因此得到的相关条纹图达不到实用要求。

针对上述问题，我们提出用条纹等值线窗口代替矩形窗口进行相关运算，生成等值线相关干涉条纹图。等值线窗口有如下特点：1) 等值线窗口的长度可以取得较长，或将其宽度加宽，使窗口内像素足够多，以尽量使散斑统计理论成立。2) 由等值线窗口的定义可知：相位变化量 $\Delta\phi$ 在等值线窗口 $m \times n$ 区域内保持不变，可使推导过程严格成立。因此，在前面相关模式公式推导中用等值线窗口代替矩形窗口，则公式**错误！未找到引用源**。重新记为：

$$C = \frac{\langle (f_1 - \langle f_1 \rangle_{m \times n})(f_2 - \langle f_2 \rangle_{m \times n}) \rangle_{m \times n}}{\left[\langle (f_1 - \langle f_1 \rangle_{m \times n})^2 \rangle_{m \times n} \right]^{1/2} \left[\langle (f_2 - \langle f_2 \rangle_{m \times n})^2 \rangle_{m \times n} \right]^{1/2}} \quad \text{错误！未找到引用源。}$$

$$= \frac{2 \langle I \rangle_{m \times n}^2 + 2 \langle I \rangle_{m \times n}^2 \cos \Delta\phi}{4 \langle I \rangle_{m \times n}^2} = (\cos \Delta\phi + 1)/2$$

由式**错误！未找到引用源**。看出，相关干涉方法得到的条纹图只包含待求的条纹相位 $\Delta\phi$ 信息，而含有散斑噪声的随机相位 β 已在相关运算中因其随机统计特性而消除了。因此等值线窗口相关模式生成的干涉条纹图避免了原有的乘性散斑噪声，解决了 ESPI 中的一个关键难题，使后续处理变得较为简单和高精度。

错误！未找到引用源。(d)、(f)是一组与矩形窗口相关条纹图对比的 CCI 条纹图，(a)、(c)、(e)的矩形窗口尺寸与对应(b)、(d)、(f)的条纹等值线窗口尺寸大致相同。可以看出，CCI 方法的结果明显优于矩形窗口相关的结果，随着窗口的增大，这种优势更加显著。特别是图 11.2.1(f)，它的条纹质量能和全息条纹图相媲美，已经近乎不含有散斑噪声。

CCI 法首次得到了正确的、高精度的 ESPI 相关干涉条纹图。从式**错误！未找到引用源**。可得，这种条纹的每个灰度都直接与相位一一对应，为高精度提取相位场打下了坚实基础，使相关干涉模式的实用和发展取得了实质性、突破性的进展。采用前面的自适应等值线窗口，可进一步提高 CCI 方法的精度。

11.2.2 基于等值线相关条纹图的相位提取方法^[11]

对于传统 ESPI 条纹图处理，最主要的困难来源于其严重的散斑噪声，而 CCI 方法生成的条纹图有两个突出优点：第一，条纹光滑性好，不含散斑噪声；第二，条纹正则性

好。利用这两个优点，我们提出下述基于 CCI 条纹图的多相移提取方法，包括：从单幅条纹图提取相位场的方法，单步、多步相移提取相位场的方法。

(1) 基于 CCI 条纹图的条纹中心线相位提取方法

我们提出的导数符号二值图提取全场条纹中心线方法对云纹、全息等质量较好的条纹图处理非常有效。但 ESPI 条纹图散斑噪声过于严重，该方法并不能直接应用。而 CCI 方法得到了高质量的 ESPI 条纹图，导数符号二值图法可直接应用于这种图像。

(2) 基于单幅 CCI 条纹图的相位提取方法

我们首先提出 90 度数字相移法，从余弦条纹图中建立正弦条纹图。有如下简单的三角函数公式和导数符号关系

$$\sin \Delta\phi = \pm\sqrt{1 - \cos^2 \Delta\phi} \quad \text{错误！未找到引用源。}$$

$$\frac{\partial \cos \Delta\phi(x, y)}{\partial x} = -\sin \Delta\phi(x, y) \frac{\partial \Delta\phi(x, y)}{\partial x} \quad \text{错误！未找到引用源。}$$

根据式错误！未找到引用源。、条纹导数符号二值图和人为相位导数符号图，即可解决式(11.2.7)符号二义性的问题，从而得出正确的正弦图，再与原来的余弦图像相除得到正切值，最后对其求反正切即可得到锯齿形相位图，即相位主值图。

(3) 基于 CCI 条纹图的单步与多步相移法提取相位场

在物体变形后，对式错误！未找到引用源。所得散斑场进行 $\pi/2$ 相移，可以得到

$$f_3(x, y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\beta + \Delta\phi + \pi/2) \quad \text{错误！未找到引用源。}$$

将变形前参考散斑场式错误！未找到引用源。与式错误！未找到引用源。)代入式错误！未找到引用源。中化简可以得到

$$C' = [1 - \sin \Delta\phi]/2 \quad \text{错误！未找到引用源。}$$

从而，由式错误！未找到引用源。与式(11.2.10)可以得到

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{1 - 2C'(x, y)}{2C(x, y) - 1}\right) = \arctan\left(\frac{\sin[\Delta\phi(x, y)]}{\cos[\Delta\phi(x, y)]}\right) \quad \text{错误！未找到}$$

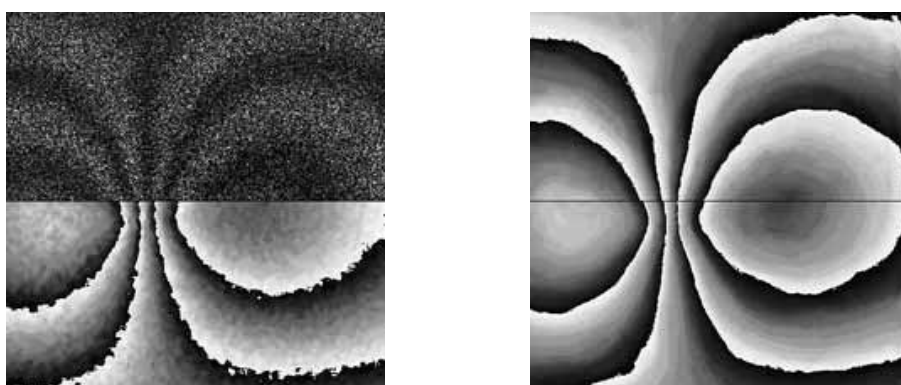
引用源。

这就是基于 CCI 方法的单步相移 (Single-phase-shifting) 方法。

同理，将 CCI 方法与传统相移法相结合，形成基于 CCI 条纹图的多步相移法。

图 11.2.2(a)上半部是用相减模式得到的散斑条纹图像，下半部为传统三步相移法得到的相位主值图 (相移运算前先对条纹图像做均值滤波)。图 11.2.2(b)上半部为用 CCI 单步

相移方法得到的相位主值图，下半部为 CCI 三步相移方法得到的相位主值图。



(a) 相减模式得到的散斑条纹图像（上半部）和传统三步相移得到的相位主值图（下半部）
(b) CCI 单步相移方法（上半部）和三步相移方法（下半部）得到的相位主值图

图 11.2.2 CCI 单步相移和三步相移法相位提取结果与传统方法比较

由此可以看出，基于 CCI 条纹图的单步相移方法、三步相移方法得到的相位分布与传统的三步相移法的结果一致，且噪声明显小，相位分布平滑。CCI 三步相移方法得到的相位主值图较单步相移方法的结果略为光滑，但没有明显区别。所以，我们推荐使用基于 CCI 条纹图的单步相移方法。该方法突破了传统相移法需要至少 3 幅图的限制，只需要两幅条纹图就可以得到质量更好的相位图。

11.2.3 生成 InSAR 干涉相位图的等值线相关干涉法^[13]

InSAR 的物理量测量是通过生成和处理干涉相位图来得到的。将 InSAR 复图像对 $V_1(r, x)$ 和 $V_2(r, x)$ 记为

$$\begin{aligned}
 V_1(r, x) &= A_1 e^{i\phi_1} = A_1 \cos \phi_1 + i A_1 \sin \phi_1 \\
 &= A_1 \cos(\phi_{1c} + u_1) + i A_1 \sin(\phi_{1c} + u_1) \\
 &= a_1 + b_1 i \\
 V_2(r, x) &= A_2 e^{i\phi_2} = A_2 \cos(\phi_{2c} + u_2) + i A_2 \sin(\phi_{2c} + u_2) \\
 &= a_2 + b_2 i
 \end{aligned} \tag{11.2.12}$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为两个天线含有噪声的回波相位，它由两部分组成：一是由路径相关的确定相位 ϕ_{1c} 和 ϕ_{2c} ，另一部分是由各种不同散射特性造成的随机相位 u_1 和 u_2 。传统的 InSAR 干涉相位图生成都是采用如下共轭相乘方法：

$$\begin{aligned}
\phi_1 - \phi_2 &= (\phi_{1c} - \phi_{2c}) + (u_1 - u_2) = \Delta\phi_c + \Delta u \\
&= \arctan\left[\frac{\text{Im}(V_1(r, x) \cdot V_2^*(r, x))}{\text{Re}(V_1(r, x) \cdot V_2^*(r, x))}\right] \\
&= \arctan\left[\frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_1 a_2 + b_1 b_2}\right]
\end{aligned} \tag{11.2.13}$$

由上式看到，共轭相乘法得到的干涉相位中包含有去相关噪声项 Δu 。该方法对复图像对进行配准和生成干涉相位图都要用到复图像对的全部四幅子图信息，并且对于短波 SAR 生成的干涉相位图去相关噪声非常严重。这种高噪声严重影响了相位解缠和高精度数字高程图的获取，已经成为 InSAR 数据处理中的瓶颈之一。

在 InSAR 干涉图与 ESPI 干涉图的散斑噪声具有相似性和前述 ESPI 的 CCI 法原理的启发下，我们提出了用于 InSAR 的生成干涉条纹图的新概念干涉法：InSAR 的等值线相关干涉法（CCI）。InSAR 的 CCI 方法不但可以生成不含斑点噪声、无相位畸变的干涉相位图，并且只需要常规方法要求的四幅子图中的任意三幅子图。

由于篇幅限制，本章不具体推导我们的 InSAR 的 CCI 方法，这里直接给出 CCI 法中最终干涉相位 $\Delta\phi_c$ 的表达式：

$$\Delta\phi_c = \arctan\left(\frac{\langle -a_1 b_2 \rangle_{m \times n}}{\langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n}}\right) = \arctan\left(\frac{\sin \Delta\phi_c}{\cos \Delta\phi_c}\right) \tag{11.2.14}$$

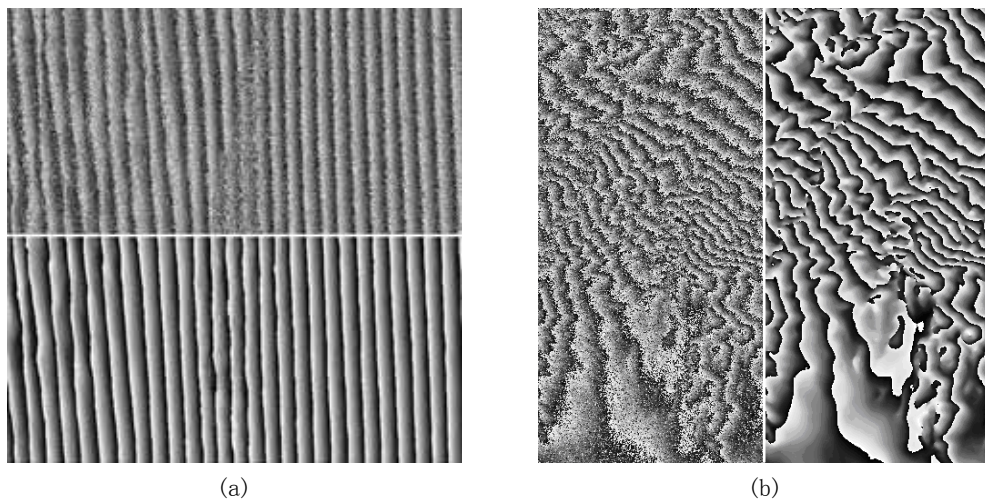
对比式(11.2.14)与传统共轭相乘方法的式**错误！未找到引用源。**可以看出，CCI 方法消除了随机项 u_1 、 u_2 和 Δu 的影响，得到的是纯相位 $\Delta\phi_c$ 的主值，不包含传统方法具有的去相关噪声 Δu 。另外，CCI 方法只用到两幅复图像的四个实虚部子图里的任意三个。

上述结论是在满足 $\Delta\phi_c$ 为常数条件的条纹等值线窗口上才严格成立。在等值线上，CCI 方法理论上可以完全消除去相干噪声 Δu ，而不损害相位值 $\Delta\phi_c$ 。当等值线条件不满足时，也可以选取矩形窗口，仍可得到近似的结果。

错误！未找到引用源。11.2.3(a)是对新疆喀什地区 ERS-1/2 C 波段 InSAR 数据处理的结果，上半部为用传统共轭相乘法生成的干涉相位图，下半部为用 31×3 窗口的等值线相关干涉法生成的干涉相位图。可以看出，用 CCI 方法得到的结果与共轭相乘法结果在交界处衔接准确，相位分布一致。说明了 CCI 方法结果的正确性，并且结果完全没有斑点噪声。

错误！未找到引用源。11.2.3(b)为对另一组 InSAR 数据分别用共轭相乘法（左）与 CCI 方法（右）生成的干涉相位图像。该 InSAR 干涉相位图的条纹更加复杂，条纹方

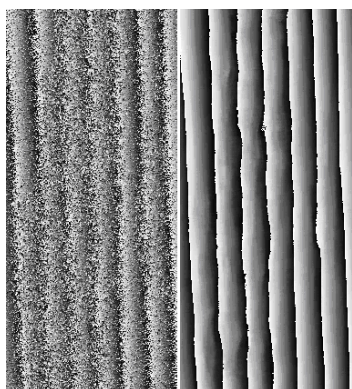
向和密度变化较大，但是 CCI 方法仍然得到了高质量的干涉相位图，说明了 CCI 方法的实用性和适应性。



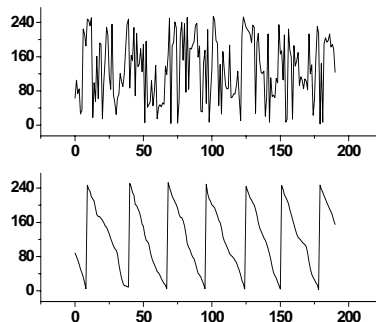
错误！未找到引用源。 11.2.3 共轭相乘方法和 CCI 方法对 InSAR 数据处理结果对比

理论分析和实验结果表明对于传统方法难以处理的相关性较差的区域，CCI 方法仍然能够得到很好的相位信息。只要得到大致正确的的等值线窗口，CCI 方法能够很大程度减轻甚至消除去相关效应，对去相关严重的区域仍可能得到不含斑点噪声并保持高质量相位信息的相位结果。

(a)11.2.4(a)的左半部分是对 InSAR 数据中去相关较严重的区域的共轭相乘法的干涉条纹图，可以看到，图中去相关区域的相位分布已几乎完全被破坏。右半部是对同一区域用 CCI 方法生成的干涉条纹图。**错误！未找到引用源。** 11.2.4(b)是(a)11.2.4(a)左右两部分同一截面的相位分布图。从图中可以看出，在 CCI 生成的相位图中，去相关区域的条纹得到完全的修复，相位分布没有受到损伤。这个实验结果显示了 CCI 方法的强大功能。



(a) 两种方法分别生成的条纹图



(b) 两种处理结果同一截面灰度（相位）分布图

图 11.2.4 共轭相乘法 and CCI 法对去相关严重区域处理结果对比

上述这些等值线滤波方法和等值线相关干涉法等方法的成功应用，充分验证了条纹方向和条纹等值线在干涉条纹图处理中的重要意义和强大功能。

干涉条纹图处理中存在两个最主要的困难：一是干涉条纹图中的高强度噪声，二是对干涉相位图进行相位解缠。实际上第一个困难是造成第二个困难的直接原因。因此，如何抑制、消除噪声同时不损害条纹相位信息是干涉条纹图处理和测量中的最重要、基础的问题之一。本章介绍了我们提出的基于条纹方向和条纹等值线的干涉条纹图处理的新思想概念和系列方法、算法，解决了光学干涉测量和 InSAR 测量中数据处理的两个关键困难和共同的基础问题，即滤除噪声而不损伤相位的等值线滤波方法和 CCI 新型干涉模式。它们形成了的有特色、有明显优势的、较完整的理论体系，对推动这些学科和技术的发展具有重要的科学价值和实用意义。

本章研究内容受国家自然科学基金（19872077，10472133）、863 专题课题（2007AA12Z121）资助。

参考文献

- [1] 于起峰, 伏思华. 基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] Yu Q F. Spin filtering processes and automatic extraction of fringe center-lines from interferometric patterns[J]. Appl Opt, 1988, 27(18): 3782-3784.
- [3] Yu Q F, Liu X L, Andresen K. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns[J]. Appl Opt, 1994, 33(17): 3705-3711.
- [4] Yu Q F, Liu X L, Sun X Y. Generalized Spin filtering and an improved derivative-sign binary image method for the extraction of fringe skeletons[J]. Appl Opt, 1998, 37(20): 4504-4509.
- [5] Yu Q F, Sun X Y, Liu X L. Spin filter with curve windows for interometric fringe patterns[J]. Applied

- Optics. 2002, 41(14):2650-2654.
- [6] Yu Q F, Liu X L. Removing speckle noise from speckle fringe patterns by spin filtering with curve surface windows[C]. Machine Vision Applications in Industrial Inspection X. 2002:73-79.
 - [7] Yu Q F, Sun X Y. Removing speckle noise and extracting the skeletons from a single speckle fringe pattern by spin filtering with curved-surface window[J]. Optical Engineering. 2003, 41(1):68-74.
 - [8] Yang X, Yu Q F, Fu S H, et al.. Two improved algorithms with which to obtain contoured windows for fringe patterns generated by electronic speckle-pattern interferometry[J]. Applied Optics, 2005, 44 (33): 7050-7054.
 - [9] Yang X, Yu Q F, Fu S H. An algorithm for estimating both fringe orientation and fringe density[J]. Optics Communications, 2007, 274(2): 286-292.
 - [10] Yu Q F, Yang X, Fu S H, et. al.. An adaptive contoured window filter for interferometric synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 23-26.
 - [11] Yu Q F, Fu S H, et. al.. Single-phase-step method with contoured correlation fringe patterns for ESPI[J]. Optics Express, 2004, 12(20): 4980-4985.
 - [12] Yu Q F, Fu S H, et. al.. Extraction of phase field from a single contoured correlation fringe pattern of ESPI[J]. Optics Express. 2004, 12(1):75-83.
 - [13] Yu Q F, Fu S H, et. al.. Generation of speckle-reduced phase images from three complex parts for synthetic aperture radar interferometry[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(11).
 - [14] Yu Q F, Fu S H, et. al., Co-registration based on three parts of two complex images and contoured windows for synthetic aperture radar interferometry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(2):288-292.

第十二章 摄像测量学应用实例

由于摄像测量具有非接触测量、测量精度高、处理实时性和自动化程度高、适于运动和动态测量、成本相对低廉、易于实施等优势，在国防和航空航天试验、工业检测、施工监测、安控监测、人体运动测量等方面有着广泛的应用。前面已经介绍了我们在摄像测量学方面的许多基础与应用研究成果，本章再介绍一些我们近年来在科研和工程实践中应用摄像测量学的实例，以利于读者更直观、更深入地了解摄像测量学的原理、技术和应用领域。

12.1 数字式光测图像自动分析判读系统

在国防试验靶场，光测由于具有客观、非接触、高精度等优势，一直被作为一种重要的外测手段，用在各种动态目标的运动测量，如火箭、导弹、炮弹的发射试验，冲击、碰撞、爆炸等过程。而对各种试验光测图像进行判读分析，可靠、高效、高精度地得到各种目标运动参数判读结果，是武器试验中的一项重要任务。

为了对多种类型目标的运动参数、结构参数等进行三维摄像测量，我们研制了一系列摄像测量分析系统。系统硬件部分主要是摄像机和计算机，分别用于采集图像和进行数据处理。其中，根据具体任务需求，摄像机可以选用普通可见光像机、红外像机、高速像机等。系统软件部分主要完成摄像测量系统标定、图像采集控制、图像预处理、图像特征识别提取、目标运动参数和表面结构形状三维解算、观测数据平滑滤波、测量结果输出显示等功能。为了提高系统的适用性，系统软件集成了多种方法和算法，并在提供目标的自动识别、匹配、定位等功能的同时，还提供多种半自动或手动方式。

胶片、视频和数字图像都是目前航空航天和武器试验靶场大量使用的图像记录方式。我们研制的“数字式靶场光测图像自动分析判读系统”既可以直接读取和分析数字图像，也可将胶片图像或视频图像采集为数字图像，并综合了各种先进的摄像测量分析技术，对图像进行自动高精度判读与分析^[1-4]。而靶场以往的胶片判读设备需要通过光学投影放大图像，然后人工对目标定位，获得目标的运动参数，判读过程自动化程度低，工作强度大，判读精度不高。我们研制的光测图像分析系列方法及系列靶场光测图像判读系统，已装备陆、海、空军全部有光测需求的试验靶场基地，成为我军靶场光测图像判读分析的主力方法和设备，极大提高了靶场光测的精度和自动化程度，提高了靶场光测试验水平。这些方法和系统在国防工业部门也得到了较广泛的应用。

12.1.1 系统构成和工作流程

“数字式光测图像自动分析判读系统”即能够直接对数字图像序列进行分析判读，也能够将胶片图像和视频图像采集为数字图像序列进行分析判读。系统总体构成如图12.1.1。

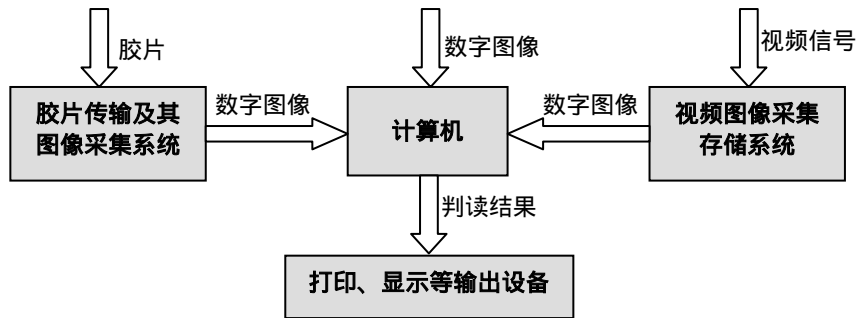


图12.1.1 数字式光测图像自动分析判读系统总体方案

系统的图像序列自动采集主要分为胶片图像采集和视频图像采集两部分。

胶片图像自动采集系统主要完成胶片图像序列的数字化与图像采集工作，组成部分主要包括由步进电机、力矩电机、传输机构等组成的输片系统，负责逐帧输送胶片；由高分辨率数字摄像机构成的图像数字化设备，负责拍摄当前帧胶片，得到数字化图像；由平面光源构成的胶片照明系统，对胶片进行均匀照明；以及控制数字化过程和进行图像存储处理的微机系统。

当图像是模拟视频信号（录像带）时，系统通过图像采集板和高速存储系统，将视频图像数字化，并实时、无压缩，长时间地将视频图像存储在计算机硬盘内。

上述图像数字化过程都通过系统软件进行控制。得到数字图像序列后，开始对图像进行分析判读，完成目标识别、定位以及运动参数测量等，并输出判读结果。

12.1.2 图像判读分析功能的实现

电影经纬仪拍摄的胶片图像中除目标外，还包含了每帧图像拍摄时刻经纬仪的方位角、高低角、时间等信息。对于胶片图像，这些信息被量化编码后以点阵码的形式记录在胶片上，如图12.1.2(a)所示；而对于视频图像，各种信息则以数字字符形式记录在视频数据中，如图(b)所示。

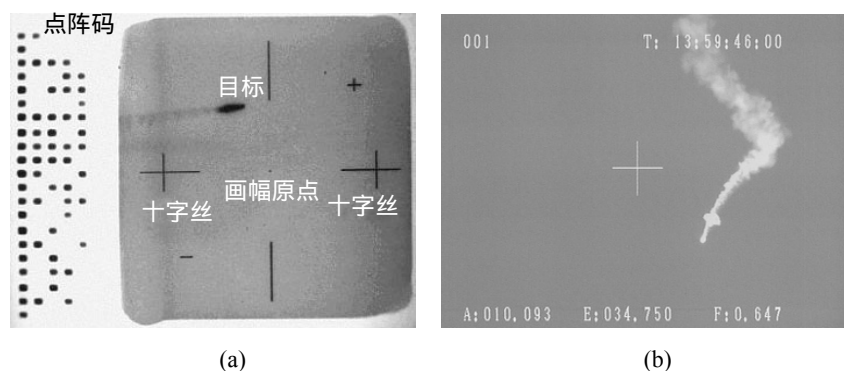


图 12.1.2 靶场光测胶片图像和视频图像

光测图像判读分析需要首先提取出胶片、视频或数字图像的成像参数（包括拍摄时间、经纬仪摄影系统主光轴的高低角和方位角等），并确定出目标偏离主光轴的脱靶量。主光轴在图像中用画幅中央原点定位，脱靶量就是目标相对于画幅原点的距离。根据主光轴的高低角和方位角，再叠加由脱靶量计算出的目标相对主光轴的方位与高低角的修正量，即得到目标实际的方位与高低角。结合目标结构信息，能够计算目标的三维姿态。如果有两台以上的经纬仪对目标成像，就可交会得到目标的三维空间位置。为完成上述任务，判读系统主要有以下功能。

1) 点阵码读取功能

对于电影经纬仪胶片图像，采用模式识别的方法，自动、可靠地提取点阵码，并根据点阵码信息格式进行译码，得到拍摄时间、经纬仪摄影系统主光轴的高低角和方位角等信息。点阵信息读取对点阵码残缺、点间灰雾、胶片划痕、污斑、点阵码大小不均有较强的适应性，对残缺或大小不均点阵码具有修复功能。

2) 字符识别功能

对于经纬仪视频图像，经纬仪的高低角、方位角和时间信息是直接以字符的形式叠加在图像上的，而这些字符信息的字体、大小和位置可能因为经纬仪型号的不同而变化。所采用的字符识别算法具有自学习能力，可以适应不同的字符格式或其它变化，自动识别这些信息。

3) 镜头误差标定与修正

在胶片图像数字化过程中，会由于镜头畸变和摄像机光轴与胶片图像不垂直等引起图像畸变误差。系统在对胶片图像数字化前，通过拍摄和分析标准正交网格图像对该畸变误差进行标定和修正。本书 3.5 节详细介绍了该方法原理。

4) “十字丝”自动定位系统

图像中的画幅中央原点是主光轴与图像面的交点，通过定位画幅原点上或两边的“十字丝”中心，达到既对画幅原点定位，又确定画幅内部坐标系的目的，并且消除了胶片图像数字化时输片机构走片误差的影响。

5) 半自动目标定位

半自动目标定位是将图像中目标的局部区域进行数字放大和伪彩等方式增强显示，然后手动对放大的目标进行定位。对图像上目标区域的放大倍数可由人工指定，目标区域的伪彩色、灰度增强、边缘锐化等显示方式可根据实际效果进行选择。

6) 自动目标定位

对具有明显特征的目标能做到准确可靠的自动跟踪定位。

对炮弹、导弹等有明显固定特征的目标，根据不同的特征，采用多种模式识别的方法和亚像素处理技术，进行定位与跟踪；

对于多种光团特征的目标，采用自适应阈值的重心法和相关滤波法，对目标进行定位和跟踪；

对较大的带有直线轮廓的目标，自动提取目标的直线边缘，确定目标中心或弹尖。

根据实际情况由用户规定，进行目标上、下、左、右边缘点定位、跟踪。

7) 目标运动参数计算

根据序列图像的目标中心、弹尖、边缘、中轴线等图像特征的判读结果，结合图像拍摄的频率等时间信息，可以进一步计算目标的轨迹、姿态、速度、加速度等运动参数。

12.1.3 靶场图像目标三维姿态测量分析

在各种靶场目标的发射、飞行试验中，目标三维姿态是各种武器和飞行器研制、试验、定型、安全控制，尤其是故障分析所需的关键参数。如果目标成像尺寸较大、较清晰，可以在目标表面绘制相对位置关系已知的合作标志点，从而将其作为合作体目标进行三维姿态参数的解算，如图 12.1.3。但在国内武器试验靶场的很多试验任务中，由于目标机动性强，需要的成像视场范围大，目标成像尺寸较小，并且由于目标远而目标图像不清晰，如图 12.1.2(a)和(b)，这使得无法用在表面绘制合作标志点的方式。因此以往的光测手段只能将目标作为点目标，通过多站图像线-线交会得到目标的空间位置，而无法对其三维姿态参数进行测量。

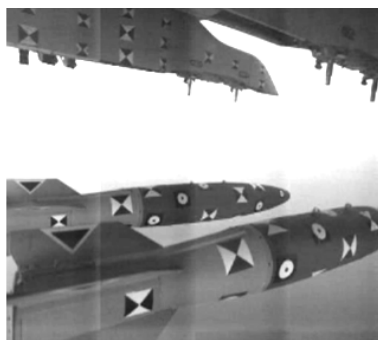


图 12.1.3 表面绘制作标志点测量目标姿态

对于成像尺寸较小但轮廓在图像上能够分辨的目标，我们提出采用提取和分析目标轮廓信息来计算目标三维姿态参数的方法。包括 6.2 节介绍的目标中轴线面-面交会、目标面积比法、长宽比法和目标圆环椭圆度法等。对于目标有一定的成像尺寸并且成像较为清晰的情况，虽然绘制作标志点难以分辨和提取，但可以采用 6.2 节介绍的四区域轮廓螺旋线法测量其滚转角，如图 12.1.4。这些方法实现了对靶场特殊目标的三维姿态测量。

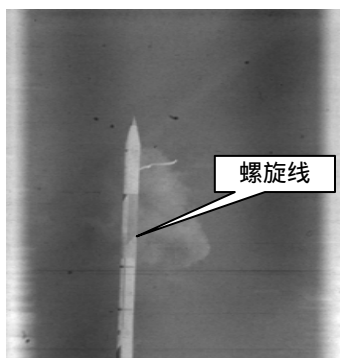


图 12.1.4 表面绘制四区域轮廓螺旋线测量目标滚转角

在实现上述各种功能的过程中，我们的系统采用了多种先进的图像分析技术，例如镜头误差标定与修正、目标亚像素定位、目标运动轨迹预测和滤波、目标三维位置、姿态等参数求解等。关于这些方法和算法可参见本书的相关章节。

12.2 火箭待发段箭体倾角实时测量图像分系统

12.2.1 箭体倾角实时测量系统简介

载人飞船发射过程中，在火箭飞离塔架前的待发段，需要实时监测箭体的倾角，如果箭体偏离垂直方向超过某一角度，表明发动机工作不正常，逃逸飞行器就要点火，承载航天员逃离火箭。“火箭待发段箭体倾角实时测量图像分系统”用于实时监测火箭箭体倾角，当倾角超过安全范围时进行报警。本实时测量图像分系统是载人

航天工程的发射安控关键子系统之一。

本系统用两台摄像机从不同角度对箭体进行拍照，如图 12.2.1(a)。系统在实时图像上自动提取和跟踪箭体上的各种标志或箭体的边缘，根据目标特性，选用形心法、重心法或相关法等亚像素定位方法对目标进行高精度定位。再采用双像机线-线交会测量多个特征点或面-面交会测量目标中轴线的方法，计算目标的倾倒角度。该系统从“神舟 3 号”发射任务开始在“神舟”系列载人飞船发射任务中正式使用。

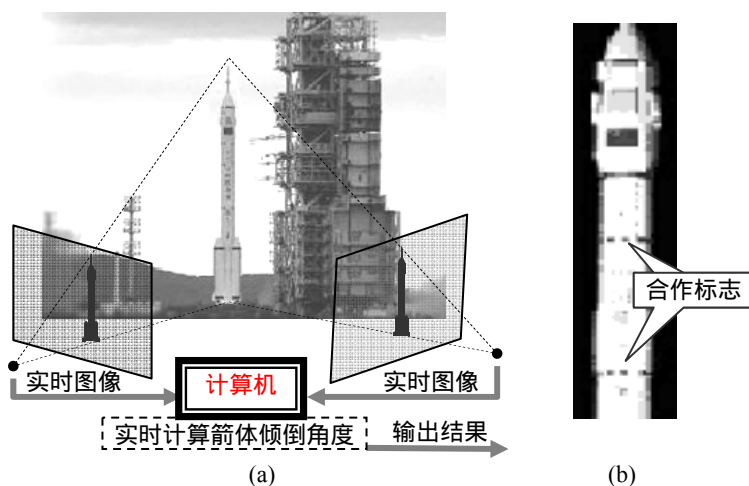


图 12.2.1 火箭待发段箭体倾倒角度实时测量图像分系统

12.2.2 保证系统可靠性与实时性的关键技术措施

本系统测量箭体倾倒角度应用的是摄像测量中的线-线交会测量空间点或面-面交会测量空间直线的原理。由于是发射任务中关键的实时安控监测系统，除了要求测量结果满足精度要求，更要保证测量的可靠性和实时性，为此我们采取了以下技术措施。

1) 利用箭体上原有的环线，将其断开形成若干实心方块形状合作标志，如图 12.2.1(b)。这些合作标志形状简单、与背景对比明显，易于快速、可靠地识别和高精度提取。虽然确定箭体倾倒角度只需要两个标志点，但我们沿箭体轴向制备和选用了多个标志点，同时进行识别定位，不但可以通过最小二乘求解提高箭体倾倒角度的计算精度，而且可以起到烟雾遮挡等特殊情况时热备份的作用，在解算时去除认为不可靠的标志点识别提取结果，提高系统的可靠性。

2) 为了提高目标识别的可靠性，在任务准备阶段采用人工方式识别各个合作标志，再用事先制作的理想模板对合作标志进行相关定位。完成对合作标志的初始定位后，开始对合作标志进行实时跟踪定位，即以上一时刻定位位置为中心，根据相邻图像间合作标志位置可能的最大变化范围确定搜索区域，并在该区域内对合作标志进行相关定位。

3) 为提高目标识别可靠性,对识别出来的目标结果进行多种判据的可靠性判别,如标志点的形状、尺寸,标志点之间的距离、方向,标志点运动连续性等综合判据,确保识别测量结果万无一失。

4) 为了提高系统的实时性,对合作标志搜索、定位算法进行优化,并且系统采用双缓存多线程异步处理。首先采集第一幅图像并存储在第一个缓存里,然后对该图像进行处理;在处理第一幅图像的同时,采集第二幅图像并存储在第二个缓存里;此时程序已经完成了对第一个缓存中图像的处理,转而对第二个缓存中图像进行处理;以此类推,即并行完成了图像采集存储和处理分析,能够大大缩短处理时间。

12.3 “神舟六号”航天员舱内三维运动单目摄像测量

在“神舟六号”载人飞船飞行试验中,航天员首次在舱内活动。而对于航天员舱内活动会对航天器的在轨飞行状态产生怎样的影响,是飞控人员关心的问题,我国没有经验。为了分析这种影响,需要对航天员舱内运动参数进行测量。由于“神舟六号”飞船轨道舱、返回舱各自只安装了一台摄像机采集图像,无法用常规的摄像测量三维交会方法,我们研究提出和采用了实景同画幅三维标定与测量的单目方法,成功完成了“神六”航天员舱内三维运动参数的测量。

12.3.1 航天员舱内三维运动单目测量原理

利用单目像机图像分析测量航天员舱内三维运动参数的基本过程包括像机参数的地面标定、图像特征的识别提取、实景同画幅三维标定和三维运动参数的解算。

(1) 像机参数标定

为了在轨进行航天员运动三维测量,需要首先对像机参数进行标定。像机内参数和像差系数的标定工作在像机安装调试好后在地面进行。制作一个正交网格板作为标定参考体,其中各网格节点的坐标精确已知。将网格板置于舱内,用待标定像机拍摄网格板图像,采用基于控制点的标定方法解算像机的内参数和像差系数。由于像机镜头是小广角,像差系数较大。

为了测量航天员相对于舱体的位置、姿态、速度等运动参数,需要对像机在飞船舱内的安装参数(外参数)进行标定。为此,在像机拍摄的舱内场景图像中提取飞船舱内若干结构点,如显示屏等仪器设备的角点等。这些结构点在飞船舱内的空间位置是已知的,将其作为控制点标定像机的外参数,就得到像机在飞船舱内坐标系的安装位置和姿态。像机安装参数的标定可以在地面进行,也可以在飞行试验中进行。即在飞行试验图

像中提取航天员身体部位及其头盔、航天服等特征点，分析航天员运动参数的同时，也提取飞船舱内结构点并标定像机参数，如图 12.3.1(a)。这样可以避免由于飞船发射过载、抖动等引起像机安装参数变化而影响测量结果。

(2) 图像特征提取

综合利用航天员身体部位、航天服和头盔表面的各种标志和飞船舱内场景中的各种仪器设备角点等作为目标特征，用于分析航天员在舱内的三维运动。如图 12.3.1(a)中的各黑或白十字丝就是某帧图像中所提取的特征点。由于这些特征并不是专门设计用于识别提取的合作标志，并且需要交互确定需要分析航天员哪些部位的测量参数，因而采用首帧图像手动识别定位，后续图像相关跟踪定位的方法来提取这些特征。其中相关定位的模板可以取自首帧图像，也可以逐帧图像或每间隔若干帧更新一次模板。

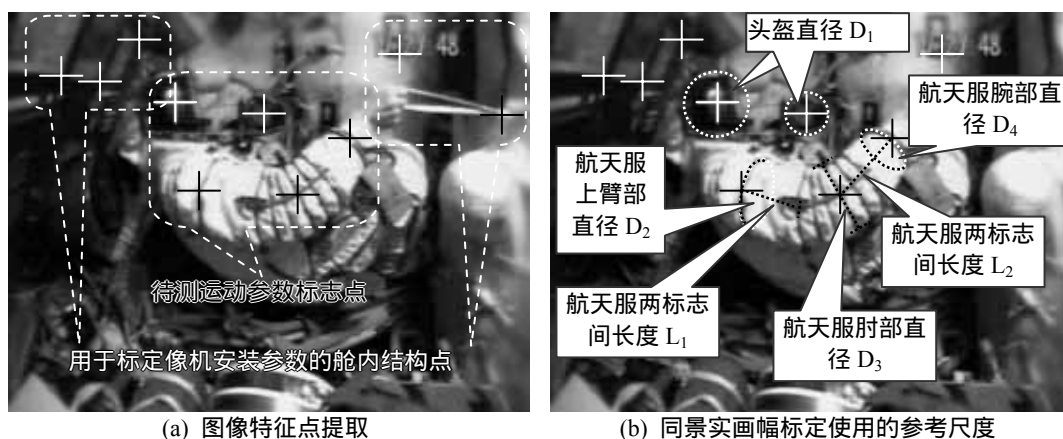


图 12.3.1 实景同画幅标定与航天员运动参数测量

(3) 航天员运动参数分析

由于只有单台像机拍摄舱内场景图像，不能进行双目交会测量。并且人体不是刚体，不能够将航天员作为有多个特征点的合作目标体，即无法按第六章中单目计算合作目标三维位置姿态参数的方法进行测量，而需要分别分析各个特征点的三维运动情况。

常规的单像机测量只能得到点目标投影在图像平面内的二维运动，即只能确定点目标相对于像机的方向，而无法确定其相对于像机的距离深度信息。但在本项目中，场景中有许多可供利用的已知信息，如头盔、航天服等的规格尺寸等，利用这些绝对尺度信息，可以计算各标志点的深度信息，进而得到这些特征点的三维运动结果。基于这一原理，我们提出和采用了实景同画幅三维标定与测量技术，综合利用这些已知信息，得到待测标志点的三维运动测量结果。下面介绍该技术。

12.3.2 实景同画幅三维标定与测量技术

实景同画幅三维标定与测量技术充分利用单像机所拍摄图像场景中不同目标的各种已知尺度信息，从单像机图像实现了对多个不同深度目标和目标位移尺度的标定，从而实现了单目对多个目标三维运动参数的测量。由于像机镜头是小广角，透视效应较明显，为我们对不同深度目标通过尺度标定确定目标深度及三维运动提供了有利条件。

如图 12.3.1(a)，在提取了若干位置已知的舱内结构点用于标定像机安装参数基础上，提取需要测量三维位置和运动的航天员头盔和航天服上臂、肘、腕部特征点，并重点提取了这些部位已知尺度信息的头盔直径、标志圆环直径和标志点间的图上距离等，如图 12.3.1(b)，并根据头盔直径、标志圆环直径、标志点间的距离等实际尺度计算对应目标的深度。

以单像机测量航天员头部的空间三维位置为例，如图 12.3.2(a)。W-XYZ 为飞船舱体坐标系，C- $X_cY_cZ_c$ 为摄像机坐标系。像机主点为 (C_x, C_y) ，等效焦距为 F 。航天员头盔的中心为 $P(X, Y, Z)$ ，直径为 D_1 。按以下步骤确定 P 在 W-XYZ 坐标系中的三维位置。

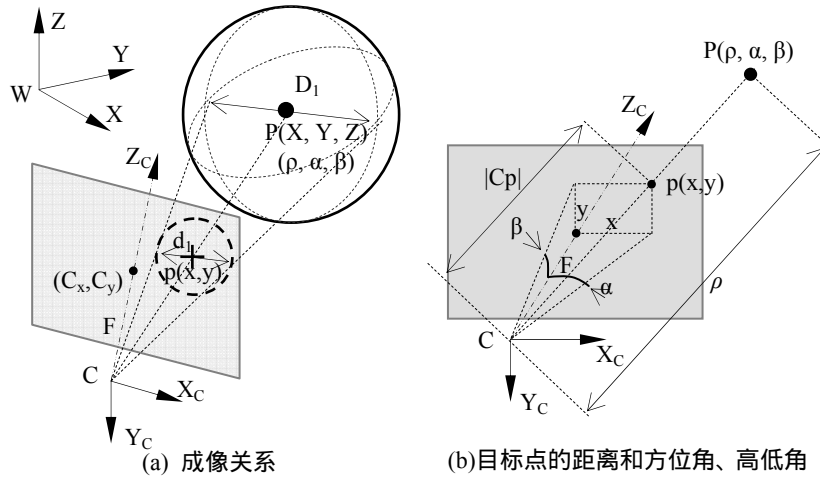


图 12.3.2 实景同画幅三维标定与测量示例

- 1) 在图像上提取各个舱内位置已知的结构点，作为控制点标定像机在舱内的安装位置和姿态，即得到像机在 W-XYZ 坐标系中的外参数。
- 2) 在图像上提取航天员头盔轮廓，设直径为 d_1 (像素)，修正像差后的头盔中心图像位置为 $p(x, y)$ 。
- 3) 计算头盔中心 P 在像机坐标系中的方向角 α 和 β ，即观察 P 点的视线 CP 与像机光轴 Z_c 的夹角在水平和竖直方向的投影角度。如图 12.3.2(b)，则根据 $p(x, y)$ 计算目标的方向角为：

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(x/F) \\ \beta = \arctan(y/F) \end{cases} \quad (12.3.1)$$

4) 计算 P 点与像机光心的距离 ρ ，如图 12.3.2(b)。由于已知航天员头盔直径为 D_1 ，而在图像上提取头盔轮廓直径为 d_1 ，根据图 12.3.2 中的几何关系，有

$$\begin{cases} \rho/|Cp| = D_1/d_1 \\ |Cp|^2 = F^2 + x^2 + y^2 \end{cases} \quad (12.3.2)$$

因而目标到像机的距离为

$$\rho = D_1 \sqrt{F^2 + x^2 + y^2} / d_1 \quad (12.3.3)$$

得到了距离和方向角度，也就确定了目标在像机坐标系中的空间三维位置，再根据像机在舱体坐标系中的外参数进行坐标变换，就得到目标在飞船舱内的空间三维位置。对各时刻目标三维位置结果进行滤波，即得到航天员头盔中心的三维轨迹、速度、加速度等空间运动参数。

12.4 “华南虎”照片的摄像测量研究

吸引广大公众关注的 2007 年“华南虎照”事件已基本尘埃落定。但自虎照公布后开始的大半年里，围绕照片中老虎的真假掀起了激烈的争论，而最初争论中的分析及论据大都是定性的，说服力不强。我们认为用科技手段帮助解决社会关注的热点问题是科技工作者义不容辞的职责，应该利用所从事的摄像测量专业技术对虎照进行分析，为真相判别提供科学的参考。利用这个例子可非常典型、形象地说明摄像测量灵活、强大的功能^[5]。

我们采用基于摄像测量与计算机视觉中的两视图和多视图的三维重建理论和方法，通过特征提取、匹配和三维解算过程对华南虎照进行了三维结构重建。针对照片中老虎分辨率较低，深度和拍摄角度变化较小，因而容易造成解算不稳定，常规摄像测量方法难以进行三维重建的问题，研究采用了全局解算、局部重建的方法。通过提取“老虎”附近较大范围空间内有较大深度变化的特征点（如树杈、枝节等）来解算多视图几何关系，大大提高了相机相对运动参数的求解精度，由此最终求解得到了“老虎”在三维空间的位置、结构等参数的定量结果。这种重建策略保证了从弱交会条件下的虎照得到满足精度要求的三维重建结果。

我们还根据平面成像之间的仿射变化关系对“华南虎”照片与疑为虎照原型的年画虎进行了相似性比较，并对拍照时可能由于相机抖动导致运动模糊，使照片视觉效果发生

变化的情况进行了分析。

12.4.1 对“华南虎”照片的三维重建分析

(1) 三维重建方法

根据摄像测量学原理，在满足三维重建条件时，使用多幅不同角度拍摄的照片可以恢复出三维场景。根据相机型号和照片属性可以得知“华南虎”照片拍摄相机的分辨率、焦距和 CCD 靶面尺寸，并将主点取在图像中心，则该问题成为在相机内参数已知条件下对目标进行三维重建的问题。我们分别采用第七章介绍的两视图和多视图三维重建方法，分别从两幅和三或四幅图像对“华南虎”照片进行三维重建分析。

从两幅图像进行三维重建分析分两步，第一步对图像中虎体和空间场景的特征点进行提取和匹配，并解算两视图之间的相对几何关系；第二步利用相对几何关系解算结果对虎体兴趣目标点进行交会重建。图像提取匹配采用本书有关章节介绍的各种匹配和亚像素定位技术，采取人工选点、自动匹配和定位的半自动方式完成。为了避免解算条件的退化，需要在清晰成像的前提下在分布较大并具有足够深度变化的范围选择同名特征点进行三维重建。

从三幅或四幅图像进行三维重建分析时，首先进行多幅图像间同名点的提取和匹配；然后组成测量矩阵方程并进行 SVD 分解，得到摄影重建结果；再引入相机内参数，并根据多视图约束关系进行欧氏重建，从而得到三维重建结果。

上述重建过程中采用光束法平差等方式对结果进行优化，提高重建的可靠性和精度。同时，我们根据一般虎体尺寸设定虎头两眼角点间的实际空间距离，为三维重建引入绝对尺度信息。

(2) 三维重建结果

选择公布的华南虎数码照片中成像质量较好的四幅图像进行处理。原始图像文件自身带有拍摄焦距等参数，CCD 传感器尺寸为 $22.2\text{mm}\times 14.8\text{mm}$ ，图像分辨率为 3888 像素 $\times 2592$ 像素，其中老虎在图像中所占区域约为 360 像素 $\times 300$ 像素。这些虎照拍摄时相机的位置、姿态等条件未知，并且成像位置、姿态变化量不大，基本的直接进行三维交会的测量方法难以完成老虎和场景的三维结构测量。而前述摄像测量与计算机视觉中的两视图、多视图方法能够对这种条件下的目标进行三维重建。

从摄像测量原理我们知道，在没有像机定位信息或空间目标尺度信息情况下，目标三维重建结果在一个比例系数下保持三维结构、形状，而与实际尺寸相差一个比例因子。而在具有像机定位信息或者控制点信息时可以获得重建目标的绝对三维定位和尺度信

息。由于各照片的拍摄点位置事先无法得到，因此重建的三维结构与实际结构将在尺度上相差一个比例系数。考虑到真实华南虎的头部宽度在 0.4m 左右，为了使结果与实际尺度相近，这里假设虎头两眼角点的实际空间距离为 0.3m，以此确定重建三维结果的尺度变换。

在此尺度假设下，分别采用两视图和多视图的方法对虎身 20 个和 11 个特征点进行三维重建解算，如图 12.4.1(a)和(b)。三维重建结果表明，包含虎面部及躯干的特征点组在成像深度方向变化小于 0.1m。图 12.4.2 为重建的虎体上 11 个特征点在空间的三维分布（坐标系的 X，Y 轴为图像横向和纵向，Z 轴为光轴指向的方向）。

我们在实验室用相似的条件模拟了从弱交会图像重建目标三维结构的过程，证明了上述分析和重建结果是可信的。



(a) 两视图重建选取的虎体特征点 (b) 三视图和四视图重建选取的虎体特征点

图 12.4.1 三维重建选取的虎体特征点

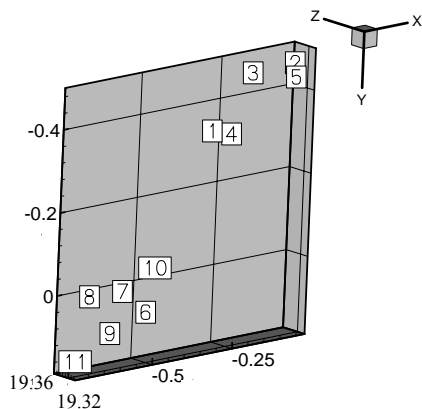


图 12.4.2 重建的虎体 11 个特征点在空间的三维分布

将重建的特征点用最小二乘法拟合空间平面，计算各点偏离拟合平面的距离，得到各点离面距离的标准差为 0.02m，最大离面距离为 0.06m，拟合平面法线与相机光轴夹角为 10.4 度。现在我们知道造假现场的年画虎照尺度比实际虎小很多，虎头两眼角点的实际距离估计约为 0.1m，据此修正尺度变换参数后，上述各点离面距离的标准差为 0.006m，

最大离面距离为 0.02m。

在此组照片虎姿状态下，根据常识可知，三维实体虎的虎头部与臀部特征点在纵深方向的变化应在 1m 以上，而我们实际重建的三维结构在纵深方向变化不到 0.05m，并且可以确定这些特征点分布在同一个近似平面的空间范围内，不符合实体华南虎的三维立体结构特征。

12.4.2 照片虎与年画虎的平面仿射变换分析

摄像测量成像理论表明，在不同方位对平面场景所成的图像之间满足仿射变换，2.1.4 节已对平面场景成像之间的仿射变换关系进行了介绍。根据这一关系，可以通过仿射变换校正使平面目标在不同距离和角度的成像重合，而三维立体目标的成像通过仿射变换不能重合。

基于上述原理，我们对年画虎和“华南虎”照片进行仿射变换校正，将年画虎变换到“华南虎”照片的角度和尺度上。然后提取此变换后的年画虎的骨架线与照片虎进行比较。图 12.4.3(a)是叠加了年画虎骨架线的“华南虎”照片，(b)图是叠加了自身骨架线的年画虎，图中虎体条纹上的黑色细实线为骨架线。从骨架线与虎体条纹的符合程度可以看出，两虎的重合度很高。采用基于特征点几何关系的相似性度量为 0.9986（相似性度量为 1 表示两者完全相似），相似性极高，二者满足平面目标成像模型。

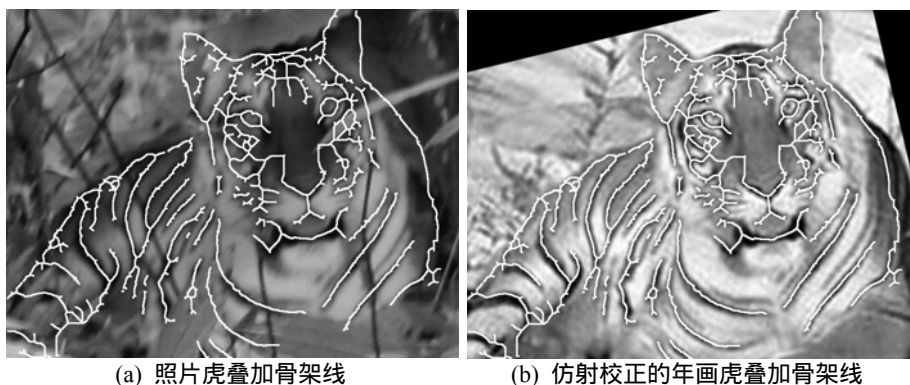


图 12.4.3 比较照片虎与年画虎的仿射相似程度

同时，我们还分析指出由于拍摄者拍照时刻的相机纵向抖动，导致部分虎照眼部的圆形眼球模糊成椭圆形，使下眼帘曲率发生变化，这些运动模糊会误导出眼睛有变化的视觉效果。

本节介绍了用摄像测量方法对“华南虎”照片真伪进行研究的的分析结果。基于双、多视图三维重建方法重建的虎体特征点三维结果表明，老虎面部、躯干、四肢等部位各点基本位于一个平面上，而老虎附近的树叶、枝杈都呈有较大纵深感的立体分布。该

实例从弱交会条件下不同角度任意拍摄的照片中，重建出了可信的物体三维结构，表明了摄像测量技术具有极强的适应性和灵活、实用的功能。

12.5 多目标运动参数的高速摄像测量

5.6节已对单像机时间序列图像的多目标跟踪匹配进行了介绍，而多目标飞行试验的待测目标有时多达几十甚至上百个，并且散布区域大，需要多台像机覆盖视场，因而还存在多像机图像间的多目标匹配问题。特别是对于多管、多弹头武器试验等应用，目标高速下落且具有破坏性，人员和设备无法靠近测量，并且不容易清晰成像，导致对多目标下落运动参数的测量存在较大的困难。

针对散布区域广、飞行速度快的多目标运动参数测量需求，我们基于高速摄像技术，采用多台高速摄像机交会覆盖多目标下落区域，集成了弱小目标提取、多像机多目标时空域联合匹配、震动扰动消除、像机参数现场标定等新方法、新技术，得到了多目标下落的三维轨迹、姿态、速度、攻角、落点等重要参数。

12.5.1 高速像机布设和标定

采用在两个站点各布设多台高速像机的方式，两个站点的摄像机组之间形成多个交会视场，覆盖靶标区域。如图12.5.1。

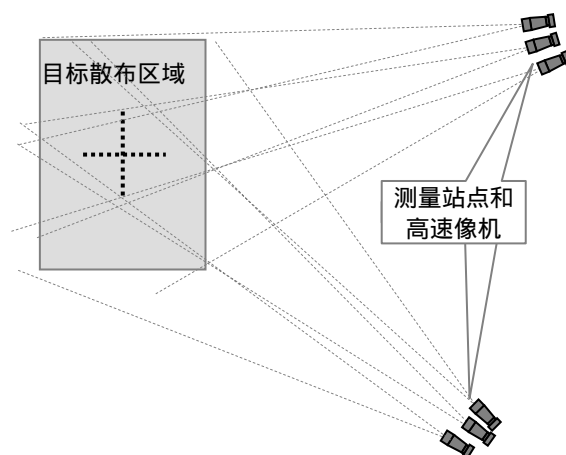


图12.5.1 多目标运动参数测量高速像机的布设

由于多目标落点散布范围比较大，并且可能具有破坏性，摄像机站点需要离开目标散布区域较远距离，并且使两个站点摄像机的交会视场覆盖待测目标散布区域。两个站点与目标区域连线的夹角要适于交会计算，通常应在60度到120度之间；为了提高成像质量，设置站位时要考虑太阳光照影响，一般应为侧光。

试验前，在目标散布区域设置若干标杆，标杆上设置合作标志。用全站仪、GPS等测

出各标杆以及各像机的位置，再采用8.4节地基飞行器视觉着陆引导实验中相同的方法标定各像机的参数。

12.5.2 目标提取和多像机多目标匹配

(1) 目标图像特征提取和像机受到震动影响的消除

试验图像处理中，采用了序列图像相关提取目标位置、高斯拟合提取目标轴线、增强放大后人工干预提取弹头位置和轴线等目标图像特征提取方式。序列图像相关和高斯拟合的提取方式适用于成像质量较好的目标，而对于成像效果较差（烟雾、遮挡，拍摄质量不佳等）的目标则可采用手动干预提取方式。关于相关提取点目标和高斯拟合提取直线目标的方法可以参阅第四章有关内容。

实验中，大量目标高速落地时引起大地的震动，并波及到测量像机。在图像上可以观察到这一震动引起的图像的整体波动。为消除这一震动带来的图像平移和旋转的影响，在进行分析处理时，采用5.1节通过图像内基准点配准补偿背景运动的方法，在每台摄像机的初始图像上选取图像区域的两个以上固定特征点，如标杆、背景特征点等，再利用相关等运算逐帧提取这些点，根据它们在不同帧图像中位置的变化，对目标图像特征提取结果进行修正，消除震动影响。

(2) 多像机多目标的时空域联合匹配

由于采用多台像机交会测量多个目标，并且目标的形状、灰度和运动特征都类似，因而如何高效、可靠地进行多像机、多目标的匹配是本项目中的一项关键内容。

对于同一台像机时间序列图像中的多个目标，可以采用第五章介绍的多目标跟踪的方法进行多目标的时域匹配。对于同一时刻不同像机图像中的多目标匹配可以采用第七章中介绍的基于极线约束的方法在空域进行匹配。另外，由于像机参数已标定，可以用一台像机图像的目标提取结果，与另一台像机同时刻图像中的目标提取结果依次进行线-线交会，取交会残差最小的目标作为匹配结果。

针对多像机多目标匹配问题，我们进一步结合时域匹配与空域匹配，通过时空域联合匹配提高匹配结果的可靠性。

首先通过时域匹配，将单像机序列图像间的同名目标连成了一条轨迹。之后对两台像机时域匹配轨迹上的目标点逐时刻进行空域匹配，检验是否能得到整条轨迹一致的匹配结果。如图12.5.2，首先用一台像机图像上某条目标轨迹起始时刻的目标，与另一台像机起始时刻所有目标通过极线约束、交会残差最小等约束条件进行匹配，确定对应的目标点，如图(a)；再按时刻次序对以这两个匹配点为起始点的轨迹上各对目标点依次进行

空域匹配，如图(b)。如果整条轨迹空域匹配结果一致，就说明时域匹配结果可信，得到了正确的时空域匹配结果。

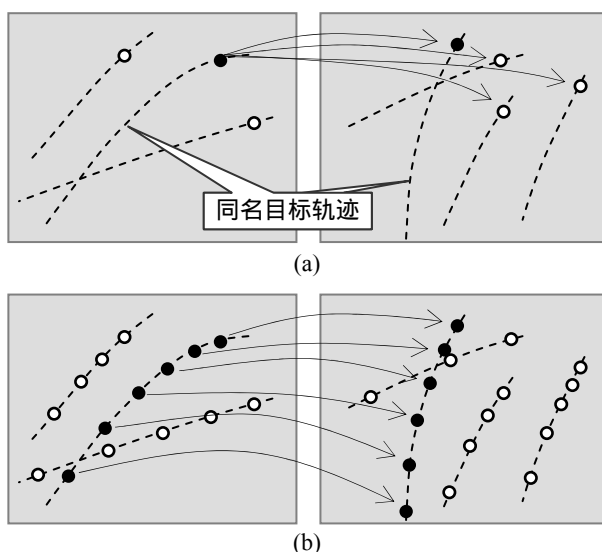


图12.5.2 在时域匹配后进行空域匹配

对于经过了一次时域匹配和一次空域匹配后仍没有确定为正确匹配结果的轨迹，则在去除已正确匹配的目标点后，对剩余的目标点重新进行时域匹配和空域匹配。通过这样的时空域匹配交互验证，能够极大地提高匹配结果的可靠性。

12.5.3 目标运动参数计算

采用双目交会的方式解算目标的运动参数。即双视线-线交会解算各个时刻各目标的空间位置，双目面-面交会解算各个时刻各目标轴线的姿态。并进一步通过数据滤波计算各目标的轨迹、速度和角速度。而目标轴线与速度方向的夹角就是目标的攻角。

试验中，并不能全程地得到目标图像，尤其是由于地面景物和烟尘的遮挡，在图像中常可能记录不到目标落地的情景。对此，采用预测滤波的方法对数据进行处理，计算得到目标落地的运动参数，包括落地时刻、落地点位置、落地速度、落地攻角等。

12.6 机翼动态变形摄像测量

在飞机研制设计过程中，结构强度试验具有重要意义。而在飞机机翼静力试验中，需要高精度测量机翼的动态位移参数，以分析其受力变形情况。采用传统的接触测量方法存在量程固定、操作复杂、对待测结构有附加干扰等缺点。而摄像测量是一种非接触测量方法，具有高精度、高自动化、适于动态测量的特点。为此，我们研制了机翼动态变形摄像测量系统，用多台数字像机从不同方位拍摄机翼表面的多个人工合作标志点，

并对采集到的序列图像进行实时分析，从而获得机翼表面多个测点相对于平衡状态的动态位移参数，对机翼的变形情况进行分析。

12.6.1 系统组成和工作过程

机翼动态变形摄像测量系统包括多台摄像机及与之对应的采图和图像处理分计算机，还包括用于测量过程控制和三维解算的主控计算机，如图12.6.1。其中在机翼上设置了许多合作标志，作为机翼三维位移测量的测点。

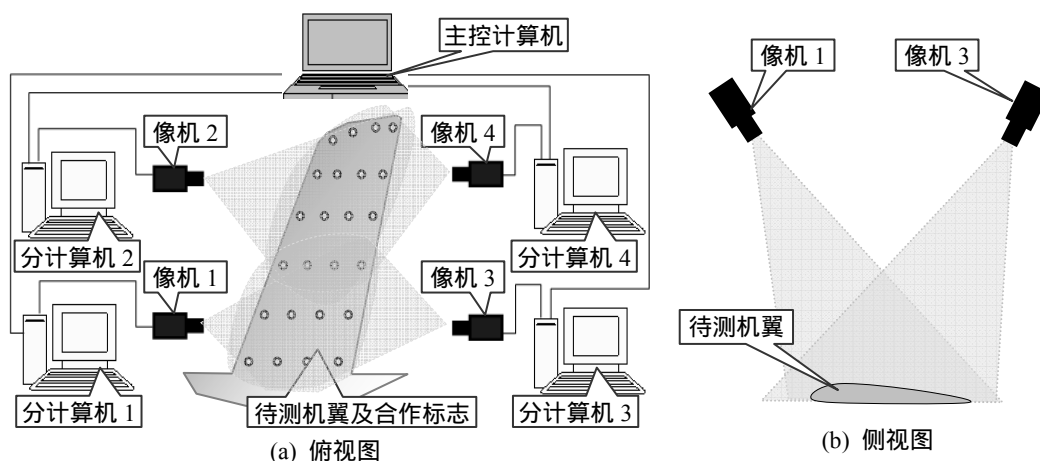


图 12.6.1 机翼动态变形摄像测量系统

该测量系统通过以下过程完成测量任务。

- 1) 安装调试摄像机，并在摄像机视场中布置标定参照物。各摄像机拍摄标定参照物图像并标定像机参数；
- 2) 在平衡状态和机翼静力试验加载过程中，各分计算机控制相应像机采集机翼图像，并对图像进行处理分析，完成各合作标志点的高精度提取；
- 3) 各分计算机将标志点提取结果传输给主控计算机，主控计算机结合像机参数和各像机图像合作标志提取结果，交会计算各合作标志的三维位置。
- 4) 将加载各阶段合作标志三维位置测量结果与平衡状态下的测量结果进行比对，得到机翼各测点的三维位置的动态变化情况，并合成得到机翼表面各部位的航向位移、垂向位移和扭转角等动态变形参数。

经测试，该测量系统的功能、性能都能够满足实际试验要求，已在实际工程的飞机结构强度试验中投入使用，取得了良好的使用效果。

12.6.2 结构动态变形测量关键技术

机翼动态变形摄像测量系统也可扩展到对其它各种结构体动态变形的测量，并根据

实际任务需要选择像机数量、布设方式等。其中主要涉及以下的关键技术。

1) 像机参数标定

高精度的标定像机参数是得到高精度测量结果的前提。在结构动态变形测量中，结构表面大量测点的动态位移测量结果必须在同一个空间坐标系下得到。而为了高精度测量较大区域内分布的大量测点，通常需要将像机分为若干组，分别交会测量部分区域内的测点。如图12.6.1中，1号和3号像机交会视场覆盖一部分测点，2号和4号像机交会视场覆盖另一部分测点，两者有部分重合。因此，像机标定过程中，常需要在同一个空间坐标系下给出各台像机外参数的标定结果，即要求各像机标定所用的控制点坐标都在同一个空间坐标系中给出。可以采用与上一节和8.4节中相同的标定策略，即待测区域布设若干合作标志，并用全站仪测出各合作标志的三维坐标，以这些合作标志作为像机标定控制点。

2) 测点合作标志设计

由于测点数量多，并且需要进行动态实时测量，因而必须能够可靠、快速地进行测点合作标志的自动识别和不同图像间同名合作标志点的匹配，并确定提取的各合作标志所对应的测点编号。为此，除了在各测点设置圆形亮点、十字标志、对角标志等合作标志外，对其中一些测点可采用编码合作标志，如图12.6.2，以便于识别匹配和确定测点编号。在完成对各测点合作标志的识别后，对其中各编码合作标志的编码进行识别，确定这些标志的编号，再依排列次序确定其它合作标志所在测点的编号。

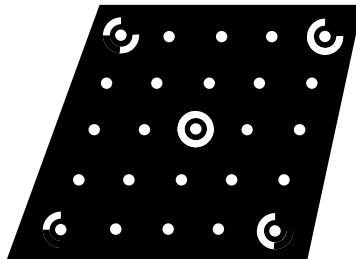


图 12.6.2 采用编码合作标志的一个示例

3) 光束法平差优化求解

在通过线-线交会得到各测点的空间三维坐标后，为了进一步提高测量结果精度，可采用光束法平差等方法对交会测量结果进行优化。优化计算中，以各合作标志在图像中的重投影位置与实际成像位置偏差的平方和作为最小化目标函数。

参考文献

- [1] Yu Q F, Zhang X H, Lu H W. Image sequence analysis system and a target-tracking algorithm with correlation and improved SUSAN filtering[C]. In : Kenneth W T, Jr. Machine Vision Applications in Industrial Inspection. San Jose, California , 2000.
- [2] 于起峰, 张小虎, 孙祥一. 数字式光测胶片图像自动分析系统[J]. 应用光学, 2001, 22(4): 30-34.
- [3] Zhang D S, Yu Q F. Analysis System for high speed photography[C]. Proceedings of 2nd Int Symposium on Impact Engineering. Beijing : 1996.
- [4] 张小虎. 靶场图像运动目标检测与跟踪定位技术研究[D]. 国防科学技术大学博士学位论文, 2006.
- [5] 李立春, 张小虎, 刘晓春, 等. “华南虎”照片的摄像测量研究[J]. 科技导报, 2008, 26(1): 59-67.