

双目立体视觉测量系统  
精度保证关键技术研究与应用

专业：工程力学

姓名：欧阳祥波

指导老师：宗志坚教授

## 摘 要

在工业产品设计与制造过程中，需要快速、高精度的获取产品表面几何信息，因此发展出不同类型的坐标测量技术和设备（CMM）。与其它测量技术相比，双目立体视觉测量系统以其能够快速获取大量零件表面数据的独特优势，很好地满足了这方面的要求，因此成为一种重要的现代坐标测量设备。本论文针对双目立体视觉测量系统的精度保证关键技术展开研究，并集成开发了一套精度较高的原型系统，取得了以下有意义的成果。

分析了视觉测量系统中硬件的选择与配置对测量范围、测量精度的影响，并给出了一种视觉测量系统的总体设计方案，明确提出了实现策略。

目前的摄像机标定大多是针对单个摄像机单独进行内外参数标定，由于标定误差的存在，用两个单独标定的摄像机在进行立体视觉测量时，其外参数的标定误差必然会引起较大的测量误差。针对这个问题，本文提出一种立体摄像机标定方法，该标定方法以空间标定点的三维重建误差最小为目标函数，对双摄像机的相对位置进行标定，减小了的空间点三维重构的误差。

在有效继承现有研究成果基础上，针对工业测量用视觉测量系统的需要，重点研究并实现了标定棋盘角点的提取、拼接图像中标志点的提取和条纹图像的二值化算法，提出了一种基于灰度校正的图像二值化方法，获得了较好的二值化效果。针对黑白图像和彩色图像分别采用了基于纹理和基于颜色的图像分割方法，通过对二维图像的处理有效的消除了测量过程中非测量对象产生的无效数据，有效的简化了点云的后处理工作。

图像匹配是立体视觉测量方法的研究重点和难点，针对宽基线立体图像匹配中严重的几何和灰度畸变，提出了一种逐步求精的立体匹配方法。该方法首先应用编码结构光的编码结构实现图像的粗匹配，利用粗匹配的结果估计匹配点之间

的几何和灰度畸变系数；然后以此为初值，采用最小二乘匹配算法实现图像的精确定匹配。

空间点的三维重建可以按不同的误差评判准则来实现，论文研究了各种误差评判准则下的三维重建算法。提出了一种基于标志点的测量数据拼接方法实现了对多次测量数据的拼接，该方法在保证拼接精度的同时，有效的降低的拼接操作的复杂性。

论文对系统的各种误差来源做了全面的分析，讨论了结构参数对测量精度的影响，建立了系统结构参数选择的基本流程。

在以上研究成果和已有技术的基础上，集成开发了一个功能较为完备的原型系统，通过大量的实验从不同的角度验证了原型系统的测量精度。

**关键词：**计算机视觉；非接触测量；编码结构光；立体匹配；三维重建；点云拼接；

Research on the Key Techniques  
to Ensure Accuracy of Binocular Vision System and Applications

Major: Mechanical Engineering

Name: Ouyang Xiangbo

Supervisor: Prof. Zong Zhijian

## Abstract

Rapid and accurate acquisition of surface geometry is quite important to the design and manufacture of industrial products. For this purpose many coordinate measuring machines (CMMs) have been developed. Compared with other CMM types, the binocular stereovision based device is more suitable for getting large number of points rapidly from a free surface at the same time, which makes it an important type of measurement device. In this thesis, some key techniques to ensure the accurate stereovision measurement were studied and then a prototype for high-accuracy measurement is proposed. Some significant achievements are listed as below.

Different types of hardware and assemble parameters were tried to compare the measuring scope and accuracy. Based on the comparison, a new design of CMM was proposed and its implementation was discussed in great details.

A new method of calibration for stereovision camera was proposed, which calibrated the relative position with an objective function calculating the least distance of 3D reconstruction. Such a new method overcame the deficiency of accumulative errors as the intrinsic and extrinsic parameters of the two cameras were calibrated respectively.

Some image-processing methods were studied on demand of the industrial stereovision measurement system. Such methods included a new algorithm for detecting chessboard corners, which located the marked points with an image projected by coded light. A new method of thresholding was also proposed to segment the image based on the rectification of brightness. To remove the noise in the cloud points, different schemes were utilized to segment color- and gray-images respectively. Hence the successive post-processing steps were greatly simplified.

Registration could be regarded as one of the most difficult tasks of stereo vision.

In the wide baseline views, corresponding points seemed to be non-identical because of significant deformation and shading. For these, a two-step method for registration was proposed. Firstly, coarse matching was performed by which the information of coded light was utilized and the value of deformation was estimated. Then the accurate matching step could be carried out by an iterative algorithm.

A 3-D point can be re-constructed under different rules. In this thesis, different reconstruction algorithms were studied different object functions and a new method based on the marked points was proposed. In the new method, marked points from multiple views were utilized so that automation and high-accuracy could be achieved.

All the errors of system were analyzed and the relationship between structure parameters and precision was discussed. And the steps of structure parameter selection were defined. At last, a proto-type system was developed by integrating our research and existed technology, on which large amount of experiments were carried out and the precision of the new system was examined.

**Keyword:** computer vision; non-contact measurement; coded light; stereo matching; 3D reconstruction; point-clouds registration;

# 目录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
第 1 章    绪论.....	1
1.1    研究背景、目的和意义.....	1
1.2    计算机视觉三维测量技术及设备概述.....	2
1.3    投影图案的选择.....	4
1.4    摄像机标定.....	5
1.5    立体匹配.....	6
1.6    三维信息的获取.....	7
1.7    数字图像处理.....	8
1.8    本文研究内容与组织.....	11
第 2 章    双目立体视觉测量系统的设计.....	13
2.1    双目立体视觉测量系统的结构.....	13
2.2    有效视场分析.....	15
2.3    系统硬件的选择.....	16
2.4    系统软件框架.....	21
2.5    系统使用流程.....	23
2.6    本章小结.....	24
第 3 章    立体视觉基本理论.....	25
3.1    线性摄像机的标定.....	25
3.2    非线性摄像机的标定.....	29
3.3    双摄像机的立体标定.....	31
3.4    对极几何约束.....	33
3.5    标定实验.....	36
3.6    本章小结.....	37

第 4 章	图像基本特征分析.....	39
4.1	图像的预处理.....	39
4.2	角点检测.....	40
4.3	标志点的提取.....	43
4.4	光栅编码图像的二值化.....	48
4.5	区域分割.....	51
4.6	本章小结.....	57
第 5 章	图像匹配.....	59
5.1	图像匹配中的基本约束.....	59
5.2	图像匹配算法分类.....	60
5.3	匹配策略.....	67
5.4	宽基线图像的匹配.....	68
5.5	本章小结.....	75
第 6 章	全局坐标下三维信息的获取.....	77
6.1	空间点的三维重建.....	77
6.2	测量数据的拼接.....	80
6.3	空间数据的区域分割.....	89
6.4	本章小结.....	93
第 7 章	误差分析与实验研究.....	95
7.1	系统的误差来源.....	95
7.2	结构参数对精度的影响.....	96
7.3	标定误差分析.....	99
7.4	图像匹配的精度.....	102
7.5	拼接误差分析.....	103
7.6	操作不当.....	104
7.7	现有世界水平测量设备的精度比较.....	104
7.8	本章小结.....	105
第 8 章	总结与展望.....	107
8.1	全文总结.....	107

8.2 工作展望.....	108
参考文献.....	109
作者攻读博士学位期间已发表和待发表的论文.....	123
致谢.....	125
原创性声明.....	127





# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景、目的和意义

随着电子技术和计算机技术的迅速发展，人类正在步入信息时代，信息技术广泛应用于社会生产生活的各个方面，深刻地改变着人们的生活。著名科学家钱学森先生曾指出：“信息技术包括测量技术、计算机技术和通讯技术。测量技术是关键和基础”，在制造业领域，在产品设计与制造过程中，几何量的测量技术同样得到越来越重要的关注，精密测量设备与系统已经成为先进制造技术的重要组成部分。

最早期的几何测量手段是使用各种标准卡尺和量具检具等对零件的尺寸、位置和形状等进行检测，但随着生产设备的精度、效率和自动化程度的提高，要求测量手段应该更加精确、高速、柔性化和通用化，传统的检测工具已经不能满足大批量生产的发展，传统检测工具也不能适用于复杂几何形状的零部件检测。应用的需求对测量技术提出了更高的要求，也促进和推动了测量技术的发展，在短短的几十年里出现了各种新型的坐标测量设备，如三坐标测量机、多关节机械臂、雷达测距仪、线结构光扫描仪等，这些新型的测量设备都是针对不同的应用需求而开发的高技术产品，各具特色但也存在明显的不足，只能适用于一定的应用要求。在复杂自由曲面的三维测量中，需要快速、精确地获取大量关于曲面形状的数据点，与其它测量技术相比，双目立体视觉测量系统能够更好地满足这方面的要求。

双目立体视觉测量技术经过二十多年的研究，其基本原理、重点和难点已经非常清楚，近年来国外发达国家相继推出先进的立体视觉测量设备。由于这一技术涉及的学科非常广泛，包括光学、电子、图像处理、机器视觉、计算机等技术，其中的任一环节的误差都会影响到最终结果的准确性，提高系统的测量精度是这一技术的核心问题，正是由于技术的广泛性和复杂性，目前国内还不具备开发高精度基于立体视觉原理的坐标测量设备的能力。本文的研究目的在于，深入研究影响双目立体视觉测量系统的精度保证技术以及集成开发技术，并应用研究成果，开发具有自主知识产权的立体视觉测量系统。本文的研究内容是广州市科学

技术局科技攻关项目“基于主随动机械臂平台的混合三坐标测量系统”的组成部分，旨在开发基于双目立体视觉原理的测量设备，该设备既可作为混合三坐标测量系统的一种可选测头，也可独立出来作为一个单独的测量系统使用。该研究在理论上将有利于立体视觉测量技术的发展，促进相关领域的技术融合与技术进步；在应用上可以为先进制造领域提供高精度的测量设备，更好地适应测量、检测、质量控制等领域的应用需求，同时提升国产先进装备的整体开发水平。

## 1.2 计算机视觉三维测量技术及设备概述

电子技术、图像处理技术和计算机技术的发展为三维测量提供了新的手段，用计算机视觉方法获取三维信息已成为最具特色和发展前景的三维测量技术。根据测量过程中是否主动使用并控制照明，计算机视觉测量方法可分为<sup>[1]</sup>被动视觉测量和主动视觉测量。被动视觉测量模拟人眼对客观世界的感知功能，实现物体三维形状的恢复，例如单目视觉方面的 shape from X, X 包括 Shading<sup>[2][3][4]</sup>, Texture<sup>[5][6][7]</sup>等。由于计算机在处理信息的过程中还远没有达到人类大脑具备的大量背景知识及学习、理解、推理、联想等高级思维能力<sup>[8]</sup>，这类方法的实际效果距离应用要求还要很大的差距，距离工业精密测量的应用更远。主动视觉测量技术的特点是通过光源的控制和运动的控制来减小计算的复杂性，其中典型的方法是结构光方法和编码光方法，这些方法都是基于三角测距原理获取距离。而基于编码结构光的立体视觉测量方法是被动测量与主动测量方法的结合，一方面利用被动视觉测量的视差法精确的确定距离的变化，另一方面利用主动视觉测量的编码结构光降低计算的复杂度。

### (1) 立体视觉法

立体视觉方法模拟人眼的视觉方式，利用分布在不同位置的摄像机获取两幅或多幅关于被测物体的图像，形成立体图像对，然后根据摄像机之间的空间位置关系以及同名像点之间的对应关系，引出两条或多条射线，通过射线的求交计算确定空间物点的三维坐标。在计算机视觉领域有大量的文献讨论这一技术，主要包括以下几个方面：摄像机标定，图像匹配和深度计算。由于空间物象坐标的几何对应关系并不复杂，通过一些人为的控制手段，选择特定的空间标定物<sup>[9][10][11]</sup>或控制摄像机的运动<sup>[12]</sup>，可以较好的解决摄像机的标定问题。但由于被测对象几

何形状和表面反射特性的复杂性，以及摄像机相对位姿的变化，立体图像对的匹配成为立体视差法中最关键和最困难的技术<sup>[13]</sup>。

## (2) 结构光和编码结构光方法

基于三角测量原理的结构光和编码结构光的方法，其基本原理在本质上与立体视觉方法是一样的。但立体视觉方法是一种被动式测量方法，立体图像对之间的匹配非常困难，而结构光和编码结构光的方法通过采用主动的照明光源，解决了匹配不确定性问题。

结构光方法采用点状<sup>[14][15]</sup>或线状<sup>[16][17]</sup>光源照射被测表面，在物体表面形成一个对比鲜明亮点或亮线。如果结构光的方位和摄像机的位姿都是确定的，则摄像机图像平面上的每一个像点都唯一对应一个空间物点；通过机械平台控制测头<sup>[18]</sup>或被测物体<sup>[19]</sup>的扫描运动，可以获得被测表面密集的三维数据。

为避免结构光方法顺序扫描时间长和需要精密运动控制平台的缺点，研究者让光源先通过一个平面光栅，然后再照射物体表面，这相当于同时使用了多个线结构光。为了知道物体表面的每条亮条纹对应为哪一条线结构光，一种方法是按照一定的顺序对条纹计数<sup>[20]</sup>，但由于遮挡等问题而很难实现。另一种方法是采用编码方式<sup>[21]</sup>，由光源发出的光线依次通过一组规则变化的光栅，摄像机获取一系列关于被测表面的图像，通过对变化规律的解码确定每条条纹的实际方位。图 1.2 所示为按格雷编码<sup>[22]</sup>规则生成的一组光栅图像，它们将在被测表面上产生 4 幅明暗间距不同的照射图像，光栅图像的数量决定了编码光的分辨率，光栅图像越多对应的编码结构光就越多。

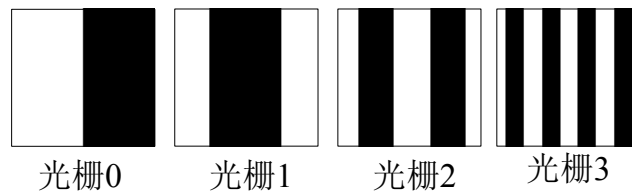


图1.2 四位的格雷编码图像

出现最早、最简单的编码结构光投射方式是用普通幻灯机投射光栅，由于光栅的定位和运动不准确，光栅图像系列中各图像之间的相对位置不够准确。为了提供编码图案的灵活性，在一些实验系统较多的采用了 LCD<sup>[23]</sup>或 DLP<sup>[24]</sup>投影仪，这类设备的主要缺点是设备分辨率有限，明暗条纹的对比和分界线不够清晰。根据需要研究者开发了高精度的编码图案投影仪<sup>[25][26]</sup>。和摄像机光学透镜一样，

投影仪透镜也存在几何畸变，同时还必须标定投影仪和摄像机之间的相对位姿，考虑到模型和算法的复杂性及可靠性，在一些系统中用线性模型对投影仪建模<sup>[27]</sup>，或先对摄像机进行标定，然后用校正后的摄像机对投影仪进行标定<sup>[28][29]</sup>。由于摄像机存在标定误差，采用这种方法标定的投影仪误差较大，三维重构的精度有限，而且整个系统的标定过程也很复杂。

立体视觉测量方法的主要问题是对应点的匹配困难，而结构光和编码结构光方法的优点之一就是较好的降低了图像匹配的难度，但是投影仪标定困难。一种在技术上可行的方法是这两种测量技术结合起来，由投影仪投射编码结构光来辅助立体摄像机完成图像匹配，然后用立体视觉方法计算空间点的三维坐标，例如 Kang 和 Webb 等<sup>[30]</sup>向被测表面投射随机的人工纹理，来辅助立体匹配；Valkenburg 和 McIvor<sup>[31]</sup>投射编码结构光到被测物体表面，由摄像机采集一系列的立体图像对，实现物体的三维测量；Daniel 和 Richard<sup>[32]</sup>采用几种不同的编码光进行实验，实现了复杂场景像素级精度的匹配。国内外也先后出现了几种基于这种测量方法的三维测量设备<sup>[33][24]</sup>。目前，这类测量方法的研究主要集中在四个方面：投影图案的选择、摄像机标定、立体匹配、三维信息的获取。数字图像的处理不是本文测量方法的专门研究内容，但由于它与所有计算机视觉系统有着密切的关系，因此也对之进行综述。

### 1.3 投影图案的选择

编码结构光被认为是简化图像匹配的最有效的途径。根据其编码规则的不同，对测量空间的编码可能需要单幅或多幅图像，使用单幅图像的编码被称为空间域编码方式，而使用多幅图像的编码被称为时间域编码方式。

空间域编码方式利用当前像素点及其邻域像素点的灰度、颜色等信息确定像素的编码，例如 Boyer 和 Kak<sup>[34]</sup>利用四种颜色组成一组竖直条纹，每组条纹被黑条纹隔离，适当的选择条纹的排列顺序，可以唯一的确定彩色条纹的编码。Chen<sup>[35]</sup>等也采用了类似的方法，彩色条纹采用 HIS 颜色模型，被黑条纹分割的条纹其亮度值由随机数确定，通过选择饱和度和色调来降低彩色条纹之间的自相关。为避免投影仪和摄像机在颜色还原方面的不足，Ito 和 Ishii<sup>[36]</sup>采用灰度规则变化的棋盘图案，从确定的三个灰度值中选定一个作为棋盘中方格的灰度值，考虑每个方

格及其邻接方格的灰度值, 这样通过一幅图像可以得到 16 位的编码分辨率。Zhang 等<sup>[37]</sup>利用伪随机编码序列, 通过改变基元的数量和窗口的大小实现窗口的唯一辨识特性。空间域编码方式的优点是只需要一幅投影图像就能唯一的表示空间区域, 合理的调整投影光的强度和摄像机曝光时间等参数可用于对运动物体<sup>[38]</sup>的测量。但这种方法的空间分辨率有限, 并且容易出现误编码。

目前, 时间域编码方式应用最为广泛。这种方法投射一系列的投影图案到被测物体, 摄像机同步的获取被测物体表面的投影图案, 最后根据像素的灰度值在图像序列中的变化规律确定其编码。在整个测量过程中, 投影仪、摄像机和被测物体的相对位置保持不变, 因此这种编码方式只能用于静止场景的测量。根据投影图像深度信息不同, 时间域编码方式的投影图像可方位黑白、灰度和彩色。例如 Valkenburg 和 McIvor<sup>[39]</sup>采用黑白相间的格雷编码作为投影图案以减少误码率, 实现了亚像素的图像匹配。李晓星<sup>[40]</sup>等采用格雷编码, 对 300mm 的立方体进行测量, 实验结果的角度误差为 0.01 度, 平面度误差 0.1mm。为提高投影图像的分辨率, Caspi<sup>[41]</sup>等使用彩色投影图像, 并定义了一种照度计算模型, 综合考虑了物体表面的反射性质、投影图像传递过程中的损失及摄像机对照度的反应, 最后的编码由投影图像的数量、颜色数量及对噪声的估计等决定。Guhgring<sup>[42]</sup>在格雷编码的基础上投影移相图像, 通过对格雷码和周期性相位的解码, 实现密集的图像编码。也有一些技术将空间域和时间域编码方式结合起来, 如 Hall 和 Rusinkiewicz<sup>[43]</sup>采用四幅黑白图像, 利用条纹的边界信息对条纹进行编码, 获得了 8 位深度的空间编码。孙军华<sup>[44]</sup>等采用金字塔光栅投射法, 实现了高密度的空间编码。

编码方式研究的主要目的是应用较少的图像实现编码的高分辨率、低误码率, 并方便后续的数字图像处理<sup>[45]</sup>。

## 1.4 摄像机标定

摄像机标定算法与采用的相机模型有关, 在要求不高的情况下多采用线性摄像机模型, 对于精度要求较高的场合必须采用非线性摄像机模型, Weng<sup>[46]</sup>对非线性摄像机的镜头畸变进行了较为完善的描述。众多的学者针对非线性摄像机的标定展开了研究, Tsai<sup>[47]</sup>认为考虑径向畸变已具有足够的精度, 引入太多的参数

不利于非线性方程的求解，并提出了著名的两步法。而 Faugeras<sup>[48]</sup>和 Weng<sup>[49]</sup>则认为在使用广角镜头时应该考虑更多的畸变参数，孙凤梅等<sup>[50]</sup>研究了简化的摄像机模型对三维重构精度的影响，指出在三维重构中不能盲目地使用简化模型，必须对摄像机内参数进行全面标定。Wei 和 Ma<sup>[51]</sup>提出一种双平面摄像机模型，该方法将线性参数和非线性参数组合成中间参数，然后进行线性求解，简化了计算过程。Zhang<sup>[52]</sup>提出一种平面模板标定方法，通过获取平面标定板在任意不同方位的几幅图像来进行摄像机内外参数的标定。Huang<sup>[53]</sup>Zhang<sup>[54]</sup>采用遗传算法来获得最优的摄像机参数。这些方法都是一些通用的摄像机标定方法，以单摄像机标定为主，以标定点重投影的像素误差最小作为标定的目标函数，没有考虑立体摄像机参数之间的相互作用对三维反求精度的影响。

摄像机自标定也是一个研究热点，Hartley<sup>[55]</sup>和 Faugeras<sup>[56]</sup>最早提出了线性摄像机的自标定方法，此后一些重要的计算机视觉会议和相关学术期刊出现了大量相关内容的文章，其基本方法是通过控制相机的运动，利用周围景物在不同图像中的对应关系实现摄像机的标定。文献<sup>[57]</sup>总结了摄像机自标定的理论与算法，文献<sup>[58][59]</sup>对摄像机标定做了概括性的介绍。自标定方法适合于摄像机焦距、光圈、位置等参数经常改变或不方便放置标定板的场合。这类方法使用方便，但从自然图像中提取的标定点存在较大的误差，标志点之间也会出现一些错误的匹配，因此标定的精度不高，通常应用于自动导航<sup>[60]</sup>、远程控制<sup>[61]</sup>等场合。

## 1.5 立体匹配

立体匹配的研究主要在两个方向展开，一个是从理解人类视觉的立体融合机制出发，综合心理学、生理学等领域的研究成果，试图建立一种通用的人类双目视觉计算模型，以此来指导机器视觉系统的立体匹配<sup>[62][63]</sup>；另一个研究方向是从实际应用和要求出发，针对专门领域建立实用的立体视觉系统，通过附加某些先验知识来降低立体匹配的难度<sup>[64]</sup>。这两方面的研究成果都为立体视觉的匹配提供了一些基本的匹配约束。

一种立体匹配方法的设计需要解决三个问题：基元的选择、匹配准则和算法结构。根据匹配基元不同选择，立体视觉匹配方法可以分为<sup>[65]</sup>基于区域的图像匹配和基于特征的图像匹配，这两种方法各有优缺点，张超<sup>[66]</sup>在其博士论文中对

基于区域的图像匹配方法做了较为详细的介绍,王慧燕<sup>[67]</sup>对图像的边缘检测及基于特征的图像匹配做了详细的介绍。

基于区域的图像匹配方法<sup>[68]</sup>以待匹配点为中心创建匹配窗口,在目标图像中查找具有最大相关性的图像窗口,以窗口的中心作为匹配点。采用基于区域的方法可以直接获得致密的匹配点,但需要逐一计算匹配窗口的相关性,因此计算量比较大;相关性的计算需要图像具有丰富的纹理信息,并且对灰度和对比度的变化比较敏感。为了改进基于区域的图像匹配方法,可以对相关系数进行抛物线拟合<sup>[69]</sup>,以提高匹配精度;杜歆等<sup>[70]</sup>采用盒滤波技术提高计算速度;马洪超和李德仁等<sup>[71]</sup>基于空间统计学对匹配窗口的大小进行自适应调整;最小二乘图像匹配<sup>[72]</sup>通过对几何变形和灰度变化的校正,可以得到 0.1 甚至 0.01 像素的匹配精度。

基于特征的图像匹配以图像中的特征点<sup>[73][74]</sup>、线<sup>[75][76]</sup>、面<sup>[77]</sup>或局部能量<sup>[78][79]</sup>为匹配基元。在许多方面,特征匹配处理立体视觉问题的精度较高、误匹配少。但由于物体表面只具有有限的特征,因此该方法只能获得有限的匹配数据,在测量系统中较少使用基于特征的图像匹配方法。

根据所选基元的固有属性,匹配准则将它表示为匹配所必须遵守的若干匹配约束,例如区域基元的灰度相似性,特征基元的形状相似性,以及它们共同服从的唯一性约束、一致性约束等。

根据选择的匹配基元和匹配准则,立体匹配的计算就变成了在某种匹配准则下的关于匹配基元的最优解问题。许多数学中的最优化技术可以应用于立体匹配,如动态规划法<sup>[80]</sup>、松弛法<sup>[81]</sup>、小波法<sup>[82]</sup>、神经网络法<sup>[83]</sup>、遗传算法<sup>[84]</sup>等,不同的算法结构表现为图像匹配的不同搜索策略。对算法结构的选择一般应兼顾有效性和计算量。

## 1.6 三维信息的获取

三维信息的获取可以分为三步骤<sup>[85]</sup>: 3D 数据获取,测量数据拼接,表面重建和优化。根据不同的误差评价准则<sup>[86]</sup>,可以采用不同的算法计算空间点的三维坐标,本文给出了各种误差评价准则下的坐标计算方法。

由于设备的测量范围有限以及测量过程中的相互遮挡,单次测量只能获得被测表面局部区域的三维数据,通过对多次测量数据的拼接,可以获得全局的三维

数据，数据拼接的精度直接影响着测量的精度。目前最精确的数据拼接方法是应用精密机构控制测头或被测物体的运动<sup>[18][19]</sup>，由控制系统提供测量数据之间的位姿变化矩阵。这类方法的主要缺点是需要庞大的机械运动平台，增加了测量系统的成本；由于平台的运动自由度有限，整个测量过程可能需要多次装夹被测物体，影响了测量的效率。ICG 方法<sup>[87][88]</sup>直接应用测量数据的几何相似性，例如指定区域的法线、曲率和切平面距离等，通过迭代计算，完成测量数据的拼接。这类拼接方法的主要优点是拼接灵活，只要两次测量数据之间存在重叠区域就能完成数据的拼接，但拼接精度有限。基于标志点的拼接方法<sup>[89][19]</sup>需要预先在测量对象表面粘贴一些特殊的标志点或球，通过两次测量数据上标志点之间的对应关系来完成测量数据的匹配。

表面重建和优化以测量获得的点云数据为基本元素，通过对测量数据的简化<sup>[90]</sup>，插值<sup>[91]</sup>、特征提取<sup>[92]</sup>和曲面重建<sup>[93]</sup>等步骤，恢复测量对象 3D 模型。

## 1.7 数字图像处理

数字图像处理是指使用计算机对图像进行加工和处理，传统的图像处理技术<sup>[94]</sup>主要集中在图像的获取、变换、增强、恢复、分割和边界提取等方面；图像分析通常是指通过计算机找出图像中包含何种目标的过程<sup>[95]</sup>，它属于智能图像处理的范畴。针对系统开发工作的需要，本文主要研究以下内容：标定角点的提取，标志点的提取，图像的二值化及图像的分割。

### （1）棋盘角点提取

棋盘角点的提取是摄像机标定过程中的一项重要工作，其目的是精确确定空间角点在图像平面上的像素坐标，角点提取的精度直接影响到摄像机标定的精度，文献<sup>[96]</sup>给出了角点检测的三个标准。角点的提取算法主要分为<sup>[97]</sup>：基于模板匹配的方法、基于边缘的方法和基于灰度变化的方法。

模板匹配法角点检测<sup>[98]</sup>的原理是，应用给定大小和旋转的模板与图像中所有相同大小的子区域进行相似性或相关性计算，认为满足一定阈值要求的子区域存在角点。由于角点拥有大量的角度、梯度特征，因此不可能设计出大量模板来匹配所有类型的角点，因此这类方法的应用受到局限。

基于边缘的方法，首先进行边缘检测，接下来沿着所得到的边缘寻找曲率最



大点或拐点作为角点<sup>[99]</sup>，或使用多边形拟合边界，把两条边界的交点作为角点<sup>[100]</sup>。这类算法由于依赖于前期的区域分割，而图像分割本身是一个复杂的工作，因此这类算法的复杂度更高，精度受图像分割的影响较大。

基于灰度变化的方法，直接利用图像的亮度的对比关系提取提取角点，算法速度快、实时性强。如 susan 算法<sup>[101]</sup>、数学形态学方法<sup>[102]</sup>、Forstner 算子<sup>[103]</sup>、harris 算法<sup>[104][105]</sup>等。其中基于灰度自相关函数的 harris 算法具有较高的稳定性，能够在图像旋转、灰度变化以及噪声干扰等情况下准确提取出角点，是目前应用比较广泛的检测方法，但 harris 算法只能达到像素级的角点检测精度。本文以 harris 算法提取的角点为初值，进一步进行亚像素的角点提取。

### （2）标志点的提取

在摄影测量、计算机视觉测量中，人工标志点是图像拼接、测量数据拼接等的重要依据。文献<sup>[106]</sup>对标志点的材料、形状和选择原则等做了详细的介绍。根据标志点是否被唯一的表示，可以分为编码标志点和普通标志点，马扬飏等<sup>[107]</sup>对编码标志点的设计和检测做了详细的介绍；Xavier Descombes 和 Josiane Zerubia<sup>[108]</sup>根据不同的应用需求对普通标志点的检测进行了分类和实验，并提出了一种适用于大范围场景测量的标志点检测方法。

由于本系统对标志点提取的精度要求较高，同时图像的成像质量较好，我们采用基于边缘检测标志点中心提取方法。该方法通过各种经典的边界提取算法获得标志点的边界像素点，然后通过椭圆拟合得到标志点的中心。

### （3）图像的二值化

使用编码结构光照射被测物体，将会获得一系列关于物体表面的条纹图像，为了对条纹图像进行解码，首先需要对摄像机获取的图像进行二值化。图像的二值化方法大致分为全局阈值、局部阈值和动态阈值。

全局阈值方法根据经验或图像的灰度分布，在整个图像空间内选定一个阈值，用这个阈值对所有的像素点进行二值化。经典的全局阈值方法有直方图法<sup>[109]</sup>、p-tile 法<sup>[110]</sup>，天津法<sup>[111]</sup>等。这类方法的主要优点是速度快，对成像条件较好、变化较小的图像效果明显；但由于没有顾及各像素之间的差异，对光照不均匀和噪声较多的图像处理效果较差。局部阈值方法<sup>[112][113][114]</sup>将图像划分为若干个子图，根据每个子图确定其相应的阈值，各子图阈值的确定方法与整体阈值类似。由于局部阈值方法考虑了图像中不同区域的灰度差异，其适应范围较整体阈

值方法广，如何对图像进行细分是这类算法的关键。动态阈值法<sup>[115][116][117][118]</sup>充分考虑了各像素的邻域特征，能够根据图像的不同背景情况自适应的改变阈值，可较精确的对图像进行二值化。但这类方法的计算量较大，速度较慢，并且它会过渡地夸大像素点邻域的灰度变化，把不均匀灰度分布的边界分割到目标中去。本文根据格雷编码的能够自我规范的特性，提出一种基于灰度校正的图像二值化方法。

#### （4）图像的分割

测量获得的数据既含有关于被测物体的有效数据，又有关于背景等物体的无效数据。针对彩色和黑白摄像机所获取的图像，本文分布采用基于颜色和基于纹理的区域分割方法，在测量的开始阶段就完成无效数据的剔除。

对于彩色图像，根据不同的硬件条件和应用要求，研究者提出了各种不同的颜色模型<sup>[94]</sup>，Gevers 等<sup>[119]</sup>对几种颜色模型作了深入的研究，指出 HSV 模型中的 H、S 分量受环境光照、物体的形状以及视环境的影响较小，可以选作颜色相似性度量的基本参数。陶霖密、徐光祐<sup>[120]</sup>等基于颜色方面多年的研究经验，提出了一种简化的 HSV 颜色空间量化模型。在前人的基础上，本文以 H、V 作为相似性度量的基本参数，以基本参数的差绝对值和作为颜色分割的相似性度量准则，对彩色图像进行区域分割。

纹理通常指的是二维空间变化的灰度所组成的图案，是一种反映像素灰度的空间分布属性的图像特征<sup>[121]</sup>，它可以作为区分被测对象和背景的又一明显特征。在图像处理中用于描述区域纹理的方法主要有结构化方法<sup>[122]</sup>和统计方法<sup>[123][124][125]</sup>。

结构化方法的基本思想是：借助一些限制图元可能的排列数规则，一个简单的纹理图元可以组成更为复杂的纹理模式。由于结构化方法必须定义纹理图元和图元的空间关系，该方法只适用于图元排列比较规则的人工图案。统计方法是指用数学统计和转换的方法对图像的空间信息进行统计，得到关于纹理的特征描述，并利用这些特征表示不同的图像。统计方法适应于分析纹理细密而且不规则的图案。测量中的背景和支撑物多属于不规则的物体，本系统采用统计学的 Laws 纹理能量测度<sup>[125]</sup>进行纹理分割。

## 1.8 本文研究内容与组织

论文选题针对大面积自由曲面快速高精度测量的需要,对双目立体视觉测量的精度保证关键技术展开研究,主要包括:摄像机标定、图像基本特征分析、图像匹配、测量数据的拼接等,并在此基础上集成开发了一套原型系统。

(1) 传统的摄像机标定方法,主要研究单摄像机内外参数的标定,而立体视觉测量系统的最终目标是要求空间点三维重构的误差最小。本文在单摄像机标定的基础上,以标定点的三维重构误差最小为外参数评价标准,完成立体摄像机的标定。

(2) 图像基本特征分析是立体视觉测量的基础,根据系统开发的需要,本文主要对一些特征的提取方法进行研究:标定图案角点的提取,标志点中心的提取,编码图像的二值化,彩色图像的颜色分割和黑白图像的纹理分割。

(3) 图像匹配是立体视觉系统最困难的部分,本文提出了一种逐步求精的图像匹配方法,首先应用编码光完成对应点的粗匹配,然后根据匹配点及其邻域在空间的法线方向计算立体图像对之间的几何变形,通过对几何变形和灰度变化的校正实现图像精匹配。

(4) 推导了不同的误差评价准则下空间点三维重建的计算公式,提出一种基于标志点的测量数据拼接方法,实现了多次测量数据的自动拼接。

(5) 对系统的误差来源做了全面的分析,讨论了结构参数对测量误差和有效视场的影响,为系统结构的优化设计提供了理论基础。

(6) 在以上工作的基础上,通过对已有技术和研究成果的集成,开发了一套原型系统,通过对比实验对该系统做了精度验证,结果表明该系统的测量精度与世界级水平的测量设备的差距很小,能够达到反求工程测量应有的精度要求。

全文共分 8 个章,按以下方式组织:

第一章:绪论。本文的背景、目的,及国内外现状及其不足,提出本文的研究内容。

第二章:系统设计技术。整个系统的硬件选择、硬件布置和软件框架。针对系统设计,在后续章节对该系统的若干关键技术展开研究。

第三章:摄像机标定。介绍立体视觉基本理论和摄像机标定的基本方法,以三维重建误差最小为误差评价准则,提出了一种立体摄像机标定方法。

第四章：图像基本特征分析。根据系统开发的需要，在现有成果的基础上改进并实现了以下技术：棋盘角点的精确提取、标志点中心位置的提取、编码图像的二值化、彩色图像的颜色分割和黑白图像的纹理分割算法。

第五章：图像匹配。研究了现有的双目立体视觉图像匹配技术，提出了一种逐步求精的图像匹配方法，通过对几何变形和灰度变化的校正实现图像的精确匹配。

第六章：三维信息获取。建立了各种误差评价准则下空间点三维重建的基本算法，提出了一种基于标志点的测量数据自动拼接方法。

第七章：误差分析与试验研究。对系统的误差来源进行了全面的分析，研究了结构参数对测量精度的影响，并借助世界级水平的测量设备验证了系统的精度。

第八章：总结与展望。总结全文，并对今后的工作提出一些建议。

## 第2章 双目立体视觉测量系统的设计

双目立体视觉测量系统通常是由两个摄像机从不同的空间位姿对被测物体同时进行拍摄,或由单个摄像机在不同的时刻、从不同的位姿对被测物体进行拍摄,获得两张不同的数字图像,通过图像匹配获得被测物体在两幅图像中的视差,并基于视差原理恢复出物体的三维信息。影响立体视觉测量系统精度的因素很多,本章将在介绍立体视觉测量系统基本原理的基础上,主要研究硬件的选择与配置对系统测量精度的影响。在本章的最后还将给出系统软件的总体结构和框架。

### 2.1 双目立体视觉测量系统的结构

两摄像机之间不同的几何结构布置将直接影响系统的有效视场、有效视场内不同位置的测量精度以及图像匹配的搜索范围<sup>[126]</sup>。在双目立体视觉系统中基本的摄像机布置方式有平行光轴方式和相交光轴方式,其它布置方式可以认为是这两种方式的演变<sup>[106]</sup>。

#### 2.1.1 平行光轴布置方式

平行光轴的摄像机布置方式是一种较简单的摄像机布置方式<sup>[127]</sup>,如图 2.1 所示, $O_1$ 、 $O_2$  分别为左右摄像机的光学中心,摄像机的焦距相同,各内部参数也相同,光轴互相平行且垂直成像平面,两摄像机的  $x$  轴重合, $y$  轴互相平行。因此将左摄像机沿  $x$  轴向右平移一段距离  $b$  (称为基线)后,两个摄像机重合。

在上述摄像机配置下,对任一空间点  $P(x_c, y_c, z_c)$ ,在左右摄像机上的图像坐标分别为  $P_1 = (u_1, v_1)$ ,  $P_2 = (u_2, v_2)$ ,此时左右图像的  $v$  坐标相等,即  $v_1 = v_2 = v$ ,由三角几何关系等到:

$$\begin{aligned} u_1 &= f \cdot X_c / Z_c \\ u_2 &= f \cdot (X_c - b) / Z_c \\ v &= f \cdot Y_c / Z_c \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中  $f$  为摄像机的焦距。定义视差  $d = u_1 - u_2$ ,则点  $P$  在左摄像机坐标系下

的坐标为：

$$\begin{aligned}x_c &= b \cdot u_1 / d \\y_c &= b \cdot v_1 / d \\z_c &= b \cdot f / d\end{aligned}\quad (2.2)$$

对于左摄像机上的任意一点，只要能在右摄像机上找到对应的匹配点，就可以确定该点的三维坐标。这也是基于视差的双目立体视觉测量的基本原理。

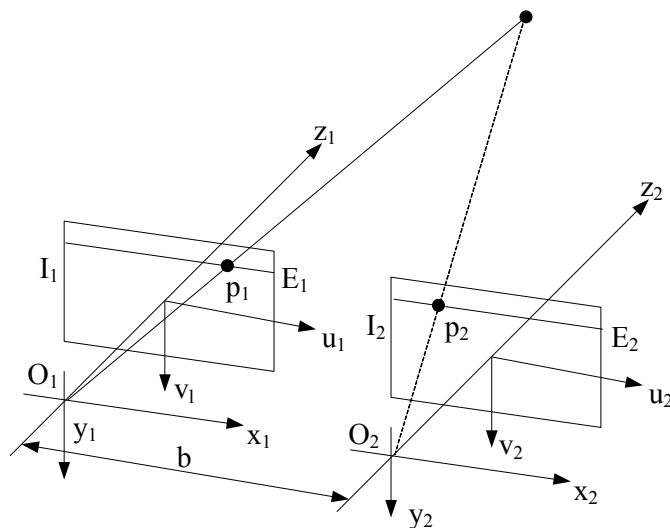


图2.1 平行光轴的立体视觉系统

平面  $PO_1O_2$  与两个图像平面  $I_1$ 、 $I_2$  的交线分别为  $E_1$ 、 $E_2$ ，两个图像点  $P_1$ 、 $P_2$  位于对应的交线，事实上， $E_1$ 、 $E_2$  就是第三章介绍的极线。在这种理想的结构形式中，摄像机的几何关系最为简单，极线  $E_1$ 、 $E_2$  与摄像机坐标系的  $x$  轴平行，这一条件为左右图像点的匹配提供了非常便利的条件。但一般情况下，在安装摄像机的时候无法看到摄像机的光轴，因此在实际安装的时候很难调整摄像机的相对位姿到图 2.1 所示的情形。

公式 2.2 中分别对  $u_1$ 、 $v_1$ 、 $u_2$ 、 $v_2$  求导，可得以下结论：基线长度越长，空间点  $P$  的计算相对误差越小；焦距越大，计算的相对误差越小。但在实际系统中，基线不能太大，否则，两个摄像机的有效视场会很小，同时物体各部分的互相遮挡也比较严重。另外，要使两个摄像机能同时观察到被测物体的表面，必须两台摄像机靠得很近，而减小基线距离，又会减小左右图像平面的视差，影响测量精度，因此这种摄像机配置方式在实际中很少应用。

### 2.1.2 相交光轴布置方式

相交光轴的摄像机布置方式是一种更一般的几何结构，如图 2.2 所示，左右摄像机的光轴成一定角度布置。采用这种形式的摄像机对安装方便，且可以根据测量对象的大小和系统要求灵活地调整基线距离  $2L$  和光轴夹角  $\alpha$ ，在结构上较好的避免了平行光轴方式中存在的视场太小和各部分互相遮挡的情况。

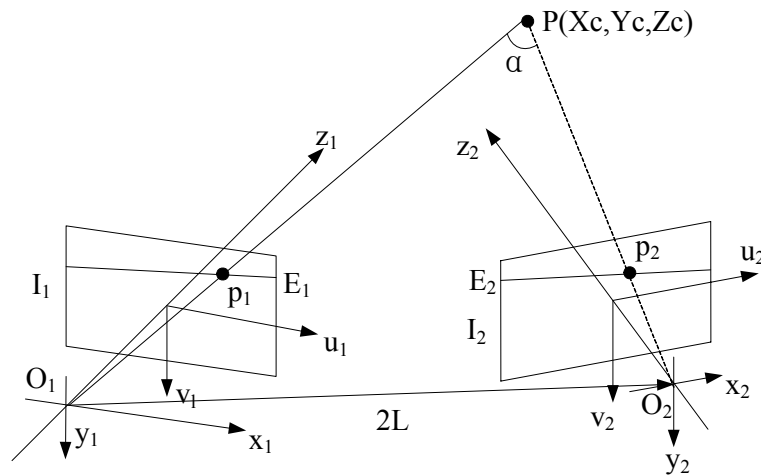


图2.2 相交光轴的立体视觉系统

从图中可以看出，在这种情况下极线  $E_1$ 、 $E_2$  不再与图像平面的  $x$  轴平行。这种情形增加了图像匹配过程中沿极线搜索的计算量；同时，随着基线距离  $2L$  和光轴夹角  $\alpha$  的增加，同一测量区域在两个图像平面上成像的几何变形也增大，增加了图像匹配的难度。尽管如此，但相比平行光轴布置方式，它仍然具有很大的优势，因此在实际中得到了较广泛的应用。

在立体视觉中，基线距离  $2L$ 、光轴夹角  $\alpha$  以及各摄像机光轴与基线的夹角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  被称为摄像机外参数<sup>[127]</sup>，对摄像机外参数的标定将在第三章中讨论。摄像机外参数对测量精度的影响是复杂的非线性关系，这一问题将在第七章讨论。

## 2.2 有效视场分析

在双目立体视觉测量系统中，双摄像机通常采用对称分布。在这种情况下，双摄像机在高度方向的有效视场与单摄像机相同，如图 2.3 (a) 所示。

以下主要讨论摄像机在水平方向的有效视场。如图（b）所示，摄像机的水平视角为  $2\varphi$ 。水平视角与镜头的焦距、摄像机图像传感器的有效尺寸有关，见 2.3.2 节。在双摄像机的有效视场内作一内切圆，圆的半径  $R$  与有效视场的大小成正比，可以用内切圆的半径近似表示有效视场的大小。其半径可表示为：

$$R = L \sin \varphi / \cos \alpha \quad (2.3)$$

其中  $\alpha$  为摄像机光轴与基线的夹角。

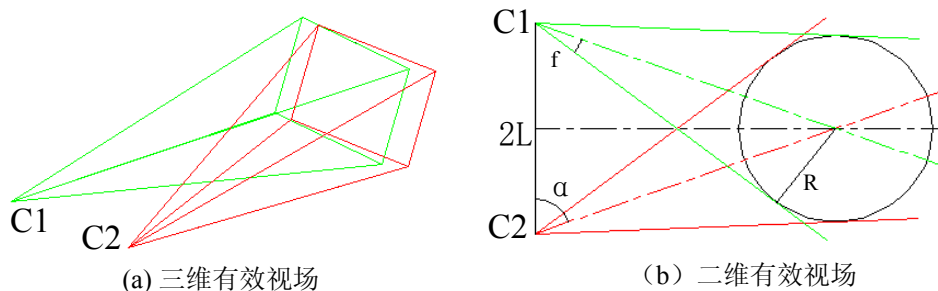


图2.3 有效视场分析

由式 2.3 可见，有效视场的大小与双摄像机的距离、夹角及摄像机的视角有关系。在测量系统设计之初，通常都有一个预期的测量范围，因此可借助公式 2.3 确定测量系统的其它结构参数，这一内容将在第七章展开讨论。

## 2.3 系统硬件的选择

相交光轴布置方式的立体视觉系统，其典型的结构形式由一台投影仪、两台摄像机和 PC 机构成，如图 2.4 所示。投影仪在 PC 机的控制下向被测物体表面投射各种纹理，使系统适用于无纹理或缺少纹理的测量对象；两台摄像机在 PC 机的控制下同步采集被测物体的图像。

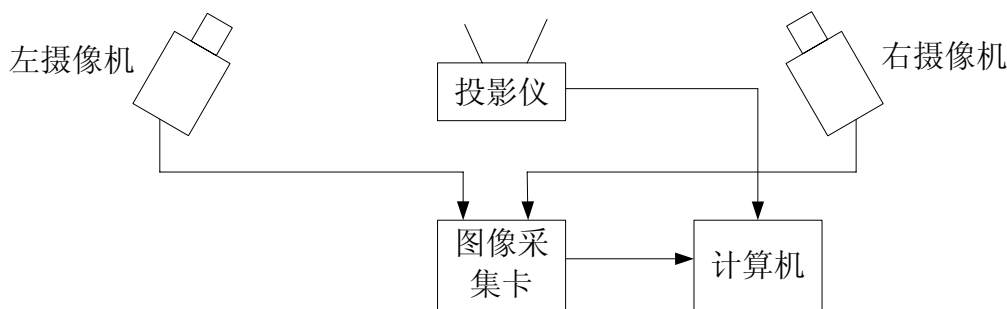


图2.4 系统硬件结构

图像质量的好坏，直接影响着后续处理的速度和处理结果的准确性，因此必



须根据测量目的，合理地选择系统的各个组成部分。对于每一次测量，需要考虑各种因素，包括：系统的速度和精度要求、被测物体的测量范围、采用彩色还是黑白摄像机、视场多大、分辨率多高等。由于计算机技术的迅猛发展，一般的 PC 机基本可以满足立体视觉测量系统的速度要求，下面主要讨论成像系统和纹理投影系统的选择。

### 2.3.1 摄像机

目前广泛使用的数字摄像机，其感光元件分为 CCD (Charge Coupled Device) 和 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) 两种，由于构造上的基本差异，两者在性能上的表现不尽相同，其性能比较如下表所示：

表 2.1 CCD 与 CMOS 性能比较：

元件性能	灵敏度	解析度	噪点	速度	耗电	成本
CCD	好	好	少	快	高	高
CMOS	差	差	多	慢	低	低

从上表可以看出，尽管 CMOS 摄像机具有低成本、低耗电等优点，但在成像品质等方面与 CCD 摄像机还有一定的差距，因此在测量系统中推荐使用 CCD 摄像机。在选择 CCD 摄像机时，需要综合考虑镜头和测量系统的要求，其中的主要参数包括 CCD 芯片尺寸、分辨率等。

通常 CCD 摄像机需要与 PC 机上的图像采集卡相连接。图像采集卡是系统中非常重要的部件，它将 CCD 输出的视频信号量化为数字信号，并压缩、存贮，供处理软件使用。但也有一些新设计的摄像机支持直接数字通信（如采用 IEEE 1394 标准或 USB2.0 标准），这时图像采集卡不再是必须的部件。考虑到后续工作会用到物体的颜色信息，在我们的原型系统中选用了大恒图像 DH-HV1300FC 彩色数字摄像机，它采用 IEEE 1394 输出方式，分辨率  $1280 \times 1024$ ，最高速度 15 帧/秒，电子快门最快速度为 1 毫秒，信噪比  $>45$  分贝，同步方式支持外触发和连续采集。

### 2.3.2 光学镜头

图像采集系统的光学镜头可以简化为具有两个凸面的单镜头，它的主要作用

是光线采集器：来自空间 3D 点的光线，经过该点到达透镜的整个锥体空间，然后被透镜聚焦到图像上的某一点，如图 2.3 所示。透镜的成像满足几何光学中的透镜成像公式。

由于镜头几何缺陷、不同颜色光线的折射率不同、被测表面不同点相对透镜深度的不同以及其它因素的影响，锥体空间在成像表面产生一个有限而模糊的斑，称为弥散圆（Circle of Confusion）；CCD 传感器阵列由物理上分散的、具有一定大小的感光元构成，于是每个感光元接收到 3D 表面上多个相邻点发出的光线，这也影响了图像的清晰度和可测量的最小细节的尺寸。

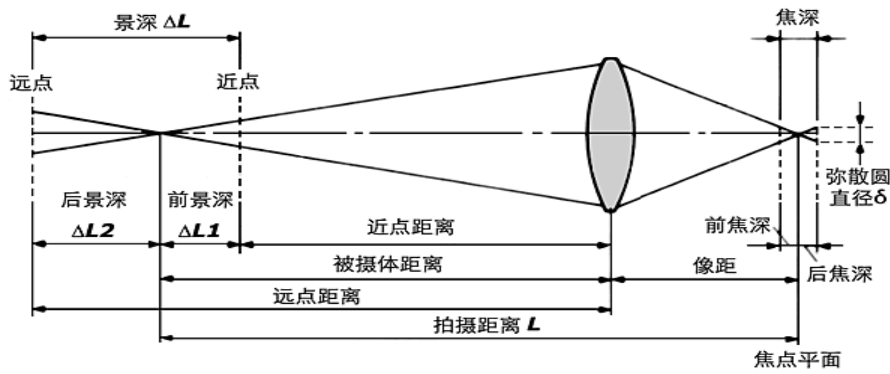


图2.4 光学镜头成像示意

如果仅仅考虑被测点相对透镜深度的变化所引起的图像模糊，可以得到下面的景深计算公式<sup>[128]</sup>：

$$\begin{aligned}\Delta L1 &= \frac{F\delta L^2}{f^2 + F\delta L} \\ \Delta L2 &= \frac{F\delta L^2}{f^2 - F\delta L} \\ \Delta L &= \Delta L1 + \Delta L2 = \frac{2f^2 F\delta L^2}{f^4 - F^2\delta^2 L^2}\end{aligned}\quad (2.4)$$

其中， $\delta$  是容许弥散圆直径，在数字图像中取为 CCD 传感器的像素尺寸； $f$ 、 $F$  分别是镜头焦距和拍摄时的光圈值， $L$  是对焦距离， $\Delta L1$ 、 $\Delta L2$  分别是前景深和后景深， $\Delta$  是景深。

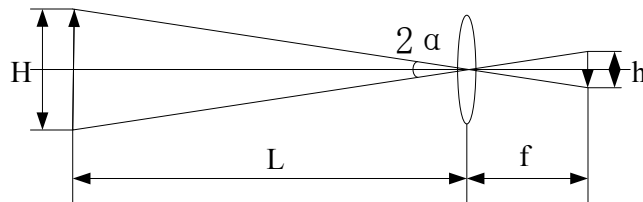


图2.5 水平、垂直方向测量范围

式 2.4 通常用于确定摄像机在深度方向的测量范围，单摄像机宽度和高度方向的测量范围随镜头焦距和摄像机 CCD 的规格大小而变化，如图 2.5 所示。对于给定焦距和 CCD 规格的摄像机，由下式计算：

$$\begin{aligned} V &= v \cdot L / f \\ H &= h \cdot L / f \\ \alpha &= \arctg(0.5v / f) \end{aligned} \quad (2.4)$$

其中， $L$ 、 $f$  的意义与式 2.3 相同， $v$ 、 $h$  分别为 CCD 摄像机的感光面的宽度和高度， $V$ 、 $H$  为系统高度和宽度方向的测量范围， $2\alpha$  为摄像机的水平视角。

光学镜头的选择需要综合考虑系统的测量范围、测头的尺寸限制以及结构参数等与测量误差的非线性关系，本文 7.3 节给出了一个系统设计的基本步骤。本系统选用的光学镜头为 COMPUTER 的 M1214—MP 固定焦距镜头，可手动调节光圈和聚焦，焦距 12mm，相对孔径 1.4，水平视角 30 度，垂直视角 22.7 度。

### 2.3.3 光栅投影仪

对于无纹理或缺少纹理的表面，为了获得稠密的点云数据，需要人工增加纹理。光栅投影仪利用白光作为光源，用玻璃、胶片或液晶光栅制作投影图案，通过光学系统投射到被测物体表面，生成附加的人工纹理。光源对成像系统的质量有很大的影响<sup>[129]</sup>，光栅投影仪在测量系统中还起到光源的作用。左右摄像机中条纹的对应是一个难点，通常采用编码结构光来解决这一问题<sup>[29]</sup>。

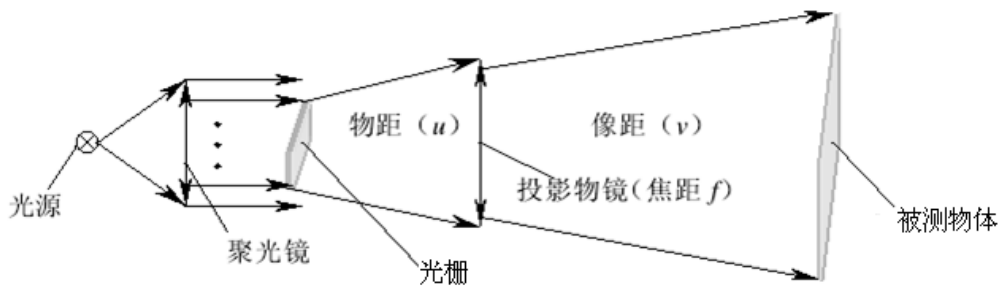


图2.6 光栅投影系统示意图

双目立体视觉测量系统对光栅投影仪的基本要求是：

- 1、亮度均匀。在光栅投影仪的照明视场范围内，边缘与中心的亮度不能相差太大，好的光源能够极大的方便后续的图像处理，并提高图像处理的精度。
- 2、光线投射准确。如前所述，左右摄像机中明暗条纹的匹配是通过编码技

术来解决的,准确的光线投射使得投射到被测物体表面的光线较好的实现预期的编码,保证编码的均匀、稳定。

3、明暗条纹的对比度高、边界清晰。被测表面空间编码的识别通过对原始图像的二值化来实现的,高对比度有利于实现图像的二值化;而清晰的边界能够有效提高二值化图像的精度。

商业测量系统大多利用胶片<sup>[130]</sup>或玻璃光栅<sup>[33]</sup>制作投影图案,并开发了专用的纹理投影仪。这类纹理投影仪针对性强、结构复杂,但效果好,能够充分满足系统的要求。实验室的原形系统中大多采用液晶投影仪来实现光栅投影,液晶光栅的最大优点是可以通过软件控制来实现各种不同的编码方案,并且亮度均有、光线投影准确,但明暗条纹的对比度不高、边界不够清晰。根据现有条件,我们选用 HITACHI 的 CP-HS995LCD 投影仪,分辨率  $1024 \times 768$ ,最小投影距离 1.2m,最小屏幕对角线尺寸 1m。

### 2.3.4 数字图像中的问题

由于镜头、CCD 传感器以及图像量化等几个方面因素会对实际的原始图像产生一些影响,其总体效果是图像的几何形状和亮度会发生畸变,主要表现为以下方面:

1、几何畸变。在实际应用中,由于透镜设计、制造以及装配过程中的缺陷和误差,摄像机的成像存在几何畸变,根据各种不同的情况主要表现为枕形畸变或鼓形畸变,如图 2.7 所示。摄像机的几何畸变可以通过标定较好的消除,这一问题将在第三章详细的讨论。

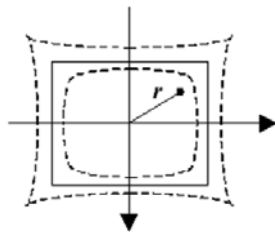


图2.7 透镜几何畸变

2、光晕。CCD 摄像机中各感光元是离散的,它们互相之间并不能做到完全绝缘,一个感光元上的电荷会泄漏到相邻的感光元中。这些电荷泄漏反映在图像平面上,结果是一个很亮的区域向外展开,生成一个比实际区域大的亮斑,这一现象称为光晕。图像采集过程中,应避免相邻区域亮度存在几个数量级上的差异。

3、颜色畸变。不同波长的光线通过透镜时，产生不同程度的折射，结果来自同一 3D 空间点的不同波长的光线，在 CCD 感光单元上可能形成几个分开的像素。例如，黑白分明的纹理边界，会在图像上形成几个像素宽的亮度变化斜坡。

4、量化效应。光强照射离散的感光单元，通过光电转换并收集获得的电信号，图像采集卡又将电信号映射为离散的灰度值，所以进行混合和舍入时量化效应比较明显，文献<sup>[131]</sup>对这一问题进行了详细的讨论。

亮度和几何形状方面的畸变会对测量系统的精度产生一定的影响，但硬件的合理选择和搭配，并通过软件的补救，可以把影响减小到最小。在本文的第三章将讨论摄像机的标定，标定后将基本消除摄像机的几何畸变；第 4 章将通过对图像的灰度校正，消除亮度畸变对图像二值化的影响。

## 2.4 系统软件框架

双目立体视觉测量软件系统的功能包括：对硬件的参数设置和控制，各种算

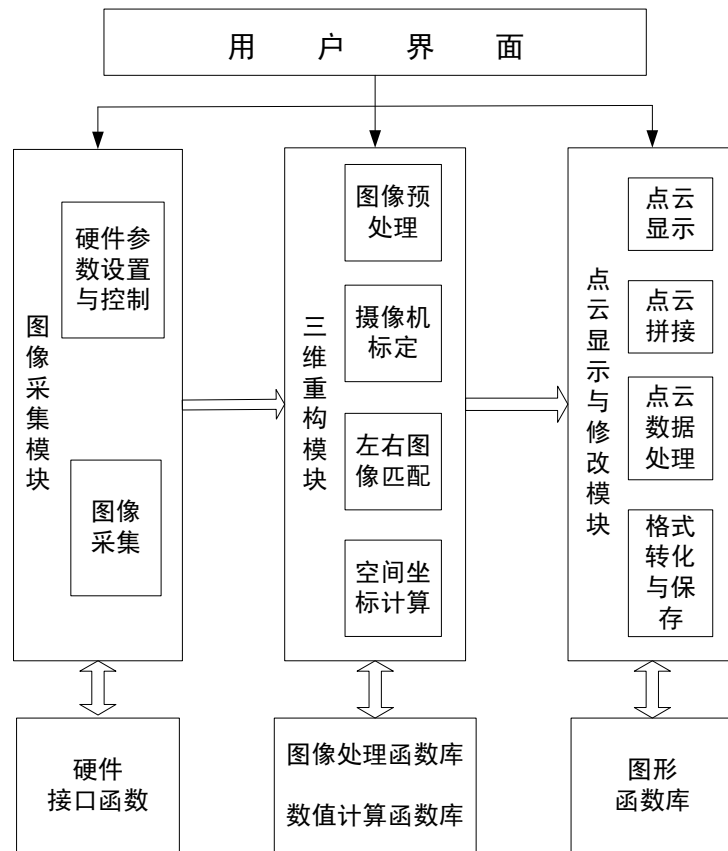


图2.8 软件系统结构图

法的实现，测量结果的显示、修改与保存，为用户提供友好的人机界面。这些功能即相对独立又互相联系，因此必须对软件系统的结构进行合理的安排，对模块的功能进行合理的划分，图 2.6 是软件系统总体设计的结构图。

### 2.4.1 系统用户界面模块

用户界面模块提供各种人机交互接口，它必须符合各种操作的内在逻辑以及软件运行时的逻辑，在功能上必须完整的包含测量系统的全部功能，使用必须方便实用。系统的用户界面采用菜单—对话框模式，向用户提供硬件参数设置、摄像机标定、三维坐标反求、点云显示及结果输出等功能。

### 2.4.2 图像采集模块

图像采集模块包括硬件参数设置及控制、图像采集两个子模块。硬件参数设置及控制子模块实现对摄像机、纹理投影仪的参数设置，以及对图像采集过程的控制。图像采集子模块通过摄像机的接口函数，完成被测物体纹理图像的采集，并将采集到图像以 bmp 格式保存在硬盘中。

### 2.4.3 三维重建模块

三维重建模块是测试系统的核心，它包括四个子模块，其中图像预处理子模块是后续模块的基础，它通过一些基本的图像处理函数，实现对原始图像的去噪、二值化、特征提取等功能。

摄像机标定子模块通过对一系列标定图像的采集及处理，计算出摄像机的内外参数。摄像机标定是三维重建的基础。

左右图像的匹配是立体视觉测量研究的重点和难点，目前还没有通用的图像匹配方法。在本文提出一种分步求精的图像匹配方法，实现立体图像对了精确匹配。

空间坐标计算子模块根据摄像机标定及图像匹配的结果，调用数值计算函数库，实现空间点 3D 坐标的反求。

#### 2.4.4 点云显示与修改模块

该模块包括四个子模块。点云显示子模块向用户显示单次或多次测量的点云数据，并通过图像界面实现显示结果的放大、缩小、旋转等操作，用户根据显示的结果判断是否满足要求。

由于设备测量范围就局限性以及测量表面的互相遮挡，单次测量很难获得被测对象的完整数据。本系统的点云拼接算法采用基于标志点的数据拼接方法，根据各标志点之间的位置关系，实现测量结果的自动拼接。

点云数据处理模块根据用户的需要，实现点云的特征提取等功能。格式转化及保存子模块将测量结果转化为其它 CAD 系统中通用的文件格式，并输出。

### 2.5 系统使用流程

系统使用流程包括以下 6 个步骤：

(1) 调整被测物体的位置，使其处在系统的测量方位之内。系统的测量范围由式 2.3、式 2.4 确定。对于表面光学特性不好的物体，需要进行简单的处理；如果物体的测量无法一次完成，还需要对测量过程做适当的规划，分割测量表面，粘贴标志点。

(2) 调整投影仪的焦距。调整投影仪光圈到最大，大光圈最容易产生虚化，有利于准确对焦；调整焦距，直到明暗条纹对比明显、边界清晰；固定焦距，在不影响投影清晰度的前提下，尽量缩小光圈，小光圈使得投影图像更加锐利。

(3) 调整摄像机的焦距。调整左右摄像机光圈到最大，设置曝光时间，避免出现过度曝光；调整左右摄像机焦距，使得成像清晰；减小光圈，获得更锐利的图像和大的景深，此时应适当增加曝光时间。

(4) 系统标定。在系统测量范围内的不同位置、不同角度放置标定板，采集 6~8 张相关图像，由系统完成摄像机标定。

(5) 测量。投影仪与摄像机协调工作，完成编码光栅图案的变化和采集；系统对采集的图案进行处理，并得到单次测量结果；重复这一过程，获得测量对象的完整数据。测量数据的拼接由系统自动完成。

(6) 结果显示与保存。显示测量结果，并保存为需要的文件格式。

## 2.6 本章小结

本章介绍了立体视觉测量系统的基本结构形式,研究了硬件的选择与配置对系统测量范围、测量精度的影响;设计了视觉测量硬件系统和软件系统的总体结构,介绍了主要功能模块及相互之间的关系。通过对整个系统的研究和介绍,引出本文将要研究的各项关键技术。



## 第3章 用于三维重构的立体摄像机标定方法

本章介绍与本文有关的双目立体视觉测量的基本理论，内容包括摄像机模型、摄像机标定和二视图之间的几何约束，其中重点介绍了非线性摄像机的标定。目前的摄像机标定都是针对单个摄像机单独进行内外参数标定，由于标定误差的存在，用两个单独标定的摄像机在进行立体视觉测量时，其外参数的标定误差必然会引起较大的测量误差。针对这个问题，本章提出一种立体摄像机标定方法，该标定方法以空间标定点的三维重建误差最小为目标函数，对双摄像机的相对位置进行标定。

### 3.1 线性摄像机的标定

摄像机模型是光学成像几何关系的简化，它反映了摄像机图像平面上的点与空间点之间的位置变化关系。最简单的模型为线性模型，或针孔模型，这种模型没有考虑相机镜头的几何畸变。在计算精度要求较高，线性模型不能精确的描述摄像机的成像几何关系，必须采用相机的非线性模型。

#### 3.1.1 线性摄像机模型

摄像机成像几何关系如图 3.1 所示。为了定量描述光学成像的几何关系，定义如下四个直角坐标系：

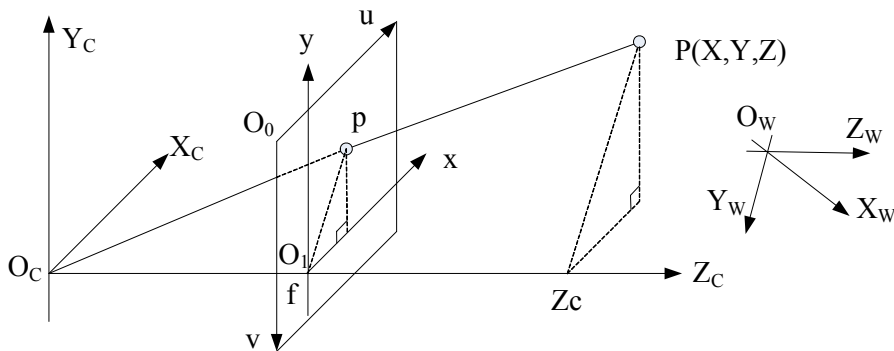


图3.1 线性摄像机成像几何模型

- 1、以毫米为单位的世界坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ ，它可以根据实际情况来设

置。

2、以像素为单位的图像坐标系 $o_0-uv$ ，其原点在图像平面的左上角， $u, v$ 方向与 CCD 传感器中像素元件的行、列平行。

3、以毫米为单位的摄像机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ ，原点在摄像机的光学中心， $x_c, y_c$ 轴分别与 $u, v$ 轴平行。

4、以毫米为单位的图像平面坐标系 $o_1-xy$ ，其原点为摄像机坐标系的 $z_c$ 轴与图像平面的交点，一般位于图像的中心，但实际会有微小的差异，在 $o_0-uv$ 坐标系中记为 $(u_0, v_0)$ 。 $x, y$ 轴分别与 $u, v$ 轴平行

空间任一点 $P$ 在图像平面上的成像位置可以用针孔模型近似表示，即任何点 $P$ 在图像上的投影位置 $p$ ，为光心 $o_c$ 与点 $P$ 的连线与图像平面的交点，这种关系也称为中心摄影或透视模型，可用以下的关系式表示：

$$\frac{X_c}{x} = \frac{Y_c}{y} = \frac{Z_c}{f} \quad (3.1)$$

其中， $(x_c, y_c, z_c)$ 为空间点 $P$ 在摄像机坐标系下的坐标； $(x, y)$ 为 $p$ 点在图像平面的坐标，用齐次坐标和矩阵表示上述投影关系式为：

$$Z_c \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

每一个像素在 $x, y$ 轴方向的物理尺寸为 $dx, dy$ ，则坐标系 $o_0-uv$ 与 $o_1-xy$ 的关系用其次坐标和矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

逆关系写成：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 $R$ 和平移向量 $t$ 来描述。空间中某一点 $P$ 在世界坐标系和摄像机坐标系下的齐次坐标如果分别为

$(x_w, y_w, z_w, 1)^T$  与  $(x_c, y_c, z_c, 1)^T$ ，其关系用矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

其中， $R$  为  $3 \times 3$  正交单位矩阵； $T$  为三维平移向量， $T = (t_x, t_y, t_z)$ ； $M_2$  为  $4 \times 4$  矩阵。

将式 (3.4) 与 (3.5) 带入式 (3.2)，得到以世界坐标系表示的物点坐标与像点标之间的关系：

$$\begin{aligned} Z_c \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= M_1 \cdot M_2 \cdot X_w = M \cdot X_w \end{aligned} \quad (3.6)$$

其中， $a_x = f/dx$ ， $a_y = f/dy$ ， $M_1$  完全由摄像机的内参数决定，称为摄像机内参数矩阵； $M_2$  由摄像机坐标系相对世界坐标系的位姿决定，称为摄像机的外参数矩阵。 $M$  为  $3 \times 4$  矩阵，称为投影矩阵，其中的参数没有具体的物理意义，有些文献<sup>[51]</sup>中称为隐参数。

### 3.1.2 线性摄像机的标定

线性摄像机模型的标定，经常使用 DLT (Direct Linear Transformation) 模型。它是由 Abdal-Aziz 和 Karara<sup>[132]</sup>于 70 年代初首先提出的成像几何的线性模型，这种线性模型参数的估计完全可以由线性方程的求解来实现。将式 (3.6) 改写成：

$$Z_{ci} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

其中  $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$  为见第  $i$  个点的坐标;  $(u_i, v_i, 1)$  为第  $i$  个点的图像坐标;  
 $m_{ij}$  为投影矩阵  $M$  的第  $i$  行  $j$  列的元素, 展开得:

$$\begin{aligned} Z_{ci} u_i &= m_{11} X_{wi} + m_{12} Y_{wi} + m_{13} Z_{wi} + m_{14} \\ Z_{ci} v_i &= m_{21} X_{wi} + m_{22} Y_{wi} + m_{23} Z_{wi} + m_{24} \\ Z_{ci} &= m_{31} X_{wi} + m_{32} Y_{wi} + m_{33} Z_{wi} + m_{34} \end{aligned} \quad (3.8)$$

消去  $z_{ci}$ , 得到两个关于  $m_{ij}$  的线性方程:

$$\begin{aligned} m_{11} X_{wi} + m_{12} Y_{wi} + m_{13} Z_{wi} + m_{14} - u_i m_{31} X_{wi} - u_i m_{32} Y_{wi} - u_i m_{33} Z_{wi} &= u_i m_{34} \\ m_{21} X_{wi} + m_{22} Y_{wi} + m_{23} Z_{wi} + m_{24} - v_i m_{31} X_{wi} - v_i m_{32} Y_{wi} - v_i m_{33} Z_{wi} &= v_i m_{34} \end{aligned} \quad (3.9)$$

如果已知  $n$  个空间点及其像点, 则有  $2n$  个关于  $M$  矩阵元素的线性方程, 用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ & & & \dots & \dots & \dots & & & & & \\ & & & \dots & \dots & \dots & & & & & \\ X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_{wn} & -u_n Y_{wn} & -u_n Z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wn} & Y_{wn} & Z_{wn} & 1 & -v_n X_{wn} & -v_n Y_{wn} & -v_n Z_{wn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 m_{34} \\ v_1 m_{34} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_n m_{34} \\ v_n m_{34} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

由式 (3.9) 可以看出, 矩阵  $M$  乘以任何不为零的常数, 不影响式该式的成立, 因此可以指定矩阵  $M$  中的任一元素为 1。这样式 (3.9) 共有 11 个未知数, 当方程数  $2n > 12$  时, 可以用最小二乘法求解该的线性方程组。

求出矩阵  $M$  后, 根据式 (3.6) 所表示的关系, 可以分解出摄像机的全部内外参数, 可参考文献<sup>[133]</sup>。在立体视觉中, 不必再分解求出摄像机的内外参数。

### 3.2 非线性摄像机的标定

线性摄像机模型给出了理想情况下的几何成像模型, 在实际的成像系统中, 由于诸多因素的影响, 摄像机成像存在几何畸变。在高精度的测量系统中, 必须考虑镜头的畸变。描述非线性畸变可用下列公式<sup>[49]</sup>:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x + \delta_x(x, y) \\ \bar{y} &= y + \delta_y(x, y)\end{aligned}\quad (3.11)$$

其中,  $(\bar{x}, \bar{y})$  为由线性摄像机模型计算出来的图像点坐标的理想值;  $(x, y)$  为图像点坐标的实际值,  $\delta_x$  与  $\delta_y$  是非线性畸变值, 它与像点在图像中的位置有关。研究表明有三类畸变对成像的影响较大: 径向畸变、离心畸变和薄透镜畸变, 分别对应为式 (3.12) 的第一项、第二项和第三项, 文献[49]对这三类误差的产生原因做了详细的分析。

$$\begin{aligned}\delta_x(x, y) &= k_1 x(x^2 + y^2) + [p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy] + s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_y(x, y) &= k_2 y(x^2 + y^2) + [p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1 xy] + s_2(x^2 + y^2)\end{aligned}\quad (3.12)$$

式中的  $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$  称为非线性畸变参数, 它与线性摄像机的内参数  $a_x, a_y, u_0, v_0$  一起构成非线性摄像机模型的内参数, 记  $D = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad s_1 \quad s_2]$ 。

20 世纪 70 年代中期, 以 Faig 为代表的学者采用非线性优化技术开始摄像机标定的研究<sup>[134]</sup>。到目前为止, 根据不同领域的应用要求, 国内外学者已经提出了数十种非线性摄像机的标定方法。其基本原理是: 在一定的摄像机模型下, 基于特定的实验条件如形状、尺寸已知的标定参照物, 对其图像进行处理, 精确的找出物、像之间的对应关系, 利用一系列的数学方法求出摄像机模型的内、外参数。其中较经典的标定方法有 Tsai 的两步法和 Zhang 的平面标定法。

另外, 还有一类不依赖于标定参照物的摄像机自标定方法<sup>[57]</sup>。这类方法的应用背景和标定精度与工业精密测量相差甚远, 在本文中不做详细讨论。

### 3.2.1 Zhang 标定方法<sup>[52]</sup>

在传统的摄像机标定方法中，为了精确控制空间点的位置，需要庞大、精密的机械设备，而 zhang 的平面标定法，只需要在平面模板上设置一系列相对位置已知的点，即可实现摄像机的标定。

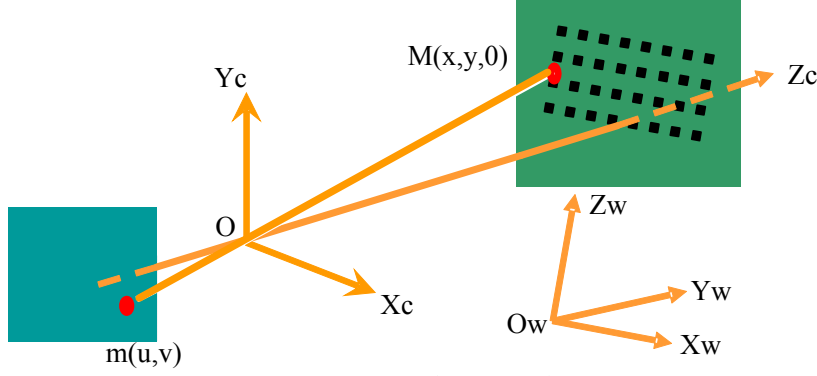


图3.3 平面标定方法

不失一般性假设，世界坐标系的  $X_w O_w Y_w$  平面与标定板重合，则所有点满足  $Z_w = 0$ ，式 (3.6) 可以该写为：

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

其中， $A$  为摄像机的内参数矩阵， $r_1, r_2, r_3$  为旋转矩阵  $R$ 、平移矩阵  $T$  对应的列向量。记： $\tilde{m} = [u \ v \ 1]^T$ ， $H = \lambda A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} = [h_1 \ h_2 \ h_3]$ ， $\tilde{M} = [X \ Y \ 1]^T$ 。上式可改写为：

$$s \cdot \tilde{m} = H \cdot \tilde{M} \quad (3.14)$$

通过图像和模板上的点的匹配，可以计算出图像和模板之间的单应矩阵  $H$  (Homography)。旋转矩阵  $R$  为单位正交矩阵，即： $r_1^T r_2 = 0$ ， $\|r_1\| = \|r_2\| = 1$ ，可以得到下面的约束方程：

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \quad (3.15)$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2$$

获取足够数目的图像，由式 (3.15) 可以计算出无线性畸变摄像机的全部内

参数，并计算外参数；然后在考虑透镜畸变的情况下，通过迭代优化完成非线性摄像机的参数。

张正友的平面标定方法是介于传统标定方法和自标定方法之间的一种方法。它既避免了传统方法设备要求高，操作繁琐等缺点，又较自标定方法的精度高，符合一些小型视觉系统的标定要求。

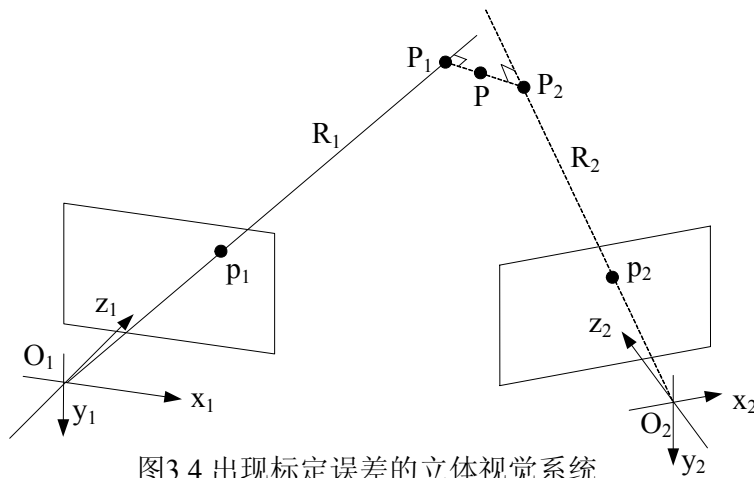
### 3.3 双摄像机的立体标定

在双目立体视觉测量系统中，每个摄像机相对世界坐标系的位姿可以通过前述的标定方法确定，然后通过坐标变化获得两个摄像机之间的相对位姿。摄像机标定一定会存在误差，对单摄像机的标定结果，只能保证在某种误差评价准则下对单摄像机的最优，不能保证空间点三维重建的结果最优，因此有必要对双摄像机进行立体标定。

对双摄像机的立体标定主要有两种方法。第一种是迭代的方法，在方程(3.9)的基础上，对其中一个摄像机附加极线约束，通过迭代计算，使得空间点在该摄像机上的投影到极线的投影距离最小<sup>[135]</sup>。第二种方法是将双摄像机的相对位姿的计算转化为本质矩阵  $Q$  的计算，然后通过  $Q$  求解矩阵  $R$ 、 $T$ <sup>[138]</sup>。

#### 3.3.1 立体标定模型

本文根据立体视觉测量的应用需求提出一种立体标定方法，通过对矩阵  $R, T$  的迭代计算，保证空间三维点到两摄像机投影射线的距离最小。图 3.4 所示是一个



个存在标定误差的立体视觉系统，空间点  $P$  在两个摄像机上的像点分别为

$p_1, p_2$ ，由于标定误差的存在，经过像点的射线  $R_1, R_2$  并不能相交，它们之间的最小距离就是点  $p_1, p_2$  之间的距离，这样两点的连线与  $R_1, R_2$  都垂直。从代数上可以表示为：

$$\overrightarrow{O_1 P_1} = z_1 \overrightarrow{O_1 p_1} = \overrightarrow{O_1 O_2} + z_2 \overrightarrow{O_2 p_2} + \lambda (\overrightarrow{O_1 p_1} \times \overrightarrow{O_2 p_2}) \quad (3.16)$$

利用单摄像机标定的内、外参数为初值，将式 3.16 改写为第一个摄像机坐标系中的方程：

$$\overrightarrow{P_1} = T + R \overrightarrow{P_2} + \lambda \cdot (\overrightarrow{P_1} \times R \overrightarrow{P_2}) \quad (3.17)$$

其中  $\overrightarrow{P_1}$  为空间点  $P$  在第一个摄像机坐标系中的坐标向量， $\overrightarrow{P_2}$  为空间点  $P$  在第二个摄像机坐标系中的坐标向量，这两个坐标值可以用单摄像机标定的结果作为初值，带入式 3.5 计算。 $R, T$  表示第二个摄像机相对第一个摄像机的旋转、平移矩阵， $\lambda$  为对应空间点  $P$  的未知量。式 3.17 是一个关于旋转矢量  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 、平移矢量  $(t_x, t_y, t_z)$  和  $\lambda$  的非线性方程，用矩阵形式表示为：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

其中， $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$  分别表示物点在第一、第二个摄像机坐标系中的坐标。由等式的第三行，可以得到  $\lambda$  的表达式：

$$\lambda = (z_1 - t_z - r_3 \cdot \overrightarrow{p_2}) / (x_1 r_2 \cdot \overrightarrow{p_2} - y_1 r_1 \cdot \overrightarrow{p_2}) \quad (3.19)$$

$$\text{简记为: } \lambda = \lambda(\alpha, \beta, \lambda, t_x, t_y, t_z)$$

将上式 3.19 带入式 3.18，可得：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} + \lambda(\alpha, \beta, \lambda, t_x, t_y, t_z) \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

对于给定的  $n$  个空间点，组成非线性方程组：

$$\begin{aligned} X^{(i)} &= A^{(i)} \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.21)$$

其中， $X^{(i)}$  为第  $i$  个点对应式 3.20 的左边部分， $A^{(i)}$  为第  $i$  个点对应式 3.20 的右边部分。式 3.21 即为双目立体标定的模型，按照同样的原理可以将此模型



推广到多摄像机的立体标定。

### 3.3.2 模型的数值化求解

式 3.21 是一个矩阵形式非线性方程组，由该方程很难直接寻找到有效代数方程，因此，采取以下策略进行数值求解：1)直接基于矩阵代数方程推导出线性迭代公式；2)线性化过程中利用矩阵方程的所有信息，构造出矛盾线性方程组，然后采取矛盾方程组的求解技术进行求解。

为讨论方便，将旋转矢量 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 、平移矢量 $(t_x, t_y, t_z)$ 中的变量统一记为 $x$ ，对之作一阶泰勒展开：

$$X^{(i)} \cong \tilde{A}^{(i)} + \sum_{k=1}^6 \frac{\partial \tilde{A}_i}{\partial x_k} dx_k \quad (3.22)$$

由高斯—塞德尔迭代法<sup>[136]</sup>求解上式，获得全部的旋转矢量 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 、平移矢量 $(t_x, t_y, t_z)$ 。理论上，当 $n \geq 3$ 可完成立体标定，在实际标定中应该使方程的个数远远超过误差的个数，以降低误差造成的影响。

## 3.4 对极几何约束

对极几何是两幅视图之间内在的射影几何<sup>[137]</sup>，它只依赖于摄像机的相对位置及其内参数，与景物毫不相干。基本矩阵是对极几何的代数表达，它给定了两幅图像之间的对应点所满足的约束。而本质矩阵是规一化图像坐标系下的基本矩阵的特殊形式，它反映了两个摄像机之间的相对位姿关系。

### 3.4.1 极线约束

假设空间点 $P$ 在两幅图像中成像， $I_1, I_2$ 为图像平面， $p_1, p_2$ 为像点，称 $p_2$ 为 $p_1$ 的对应点，反过来， $p_1$ 是 $p_2$ 的对应点。如图 3.5 所示， $P$ 与两摄像机的光学中心 $O_1, O_2$ 组成的三角形在平面 $\pi$ 上，平面 $\pi$ 交两个图像平面于直线 $E_1, E_2$ ，显然点 $p_1, p_2$ 分别位于直线 $E_1, E_2$ 上。这样，对 $p_1$ （或 $p_2$ ）的对应点的搜索不需要在整个图像上进行，它必然位于直线 $E_2$ （或 $E_1$ ）上。称直线 $E_1$ （或 $E_2$ ）为图像平面 $I_1$ （或 $I_2$ ）上对应点 $p_2$ （或 $p_1$ ）的极线，平面 $\pi$ 称为对极平面， $O_1, O_2$ 的

连线称为基线，所有的对极平面组成一个经过基线的平面族。基线与图像平面的交点  $e_1, e_2$  称为极点，从几何上可以容易的证明，所有的极线相交于极点。极线约束给定了对应点匹配中的重要约束。

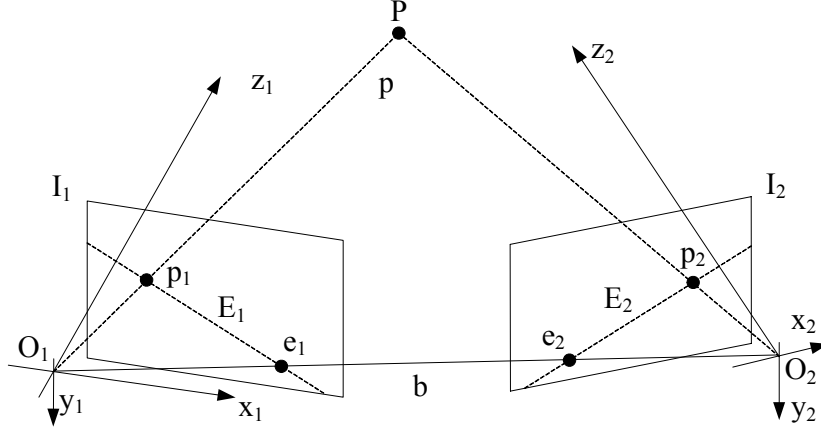


图3.5 极线约束

### 3.4.2 基本矩阵

基本矩阵是极线约束的代数表达，在计算机视觉领域有着重要的意义，对基本矩阵的精确估计已经成为一个重要的研究方向。对基本矩阵的估计主要分为三类<sup>[138]</sup>：线性方法、迭代方法和鲁棒方法，本节主要介绍在两摄像机内、外参数已知的情况下，基本矩阵的计算<sup>[127]</sup>。

将两个摄像机的投影方程（3.7）写成：

$$\begin{aligned} Z_{c1}u_1 &= M_1x_p = (M_{11} \quad m_1)x_p \\ Z_{c2}u_2 &= M_2x_p = (M_{21} \quad m_2)x_p \end{aligned} \quad (3.23)$$

其中  $x_p$  为空间点  $P$  在世界坐标系下的齐次坐标， $u_1, u_2$  为像点的图像齐次坐标，矩阵  $M_1, M_2$  中左边的部分分别记作  $M_{11}, M_{21}$ ，右边的部分分别记作  $m_1, m_2$ 。

如果将  $x_p = (X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp}, 1)^T$  记作  $x_p = (x^T \quad 1)^T$ ，其中  $x = (X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp})^T$ ，将（3.23）展开，并消去  $x_p$  得：

$$Z_{c2}u_2 - Z_{c1}M_{21}M_{11}^{-1}u_1 = m_2 - M_{21}M_{11}^{-1}m_1 \quad (3.24)$$

由于上式两边是三维向量，包含了三个等式，用这三个等式消去  $Z_{c1}, Z_{c2}$  后，得到一个与  $Z_{c1}, Z_{c2}$  无关的  $u_1, u_2$  的关系。将上式的右边的向量记着  $m$ ，即：



$$m = m_2 - M_{21}M_{11}^{-1}m_1 \quad (3.25)$$

将由  $m$  定义的反对称矩阵记作  $[m]_x$ ，用  $[m]_x$  左乘式 (3.24) 的两边，由  $[m]_x m = 0$  可知：

$$[m]_x (Z_{c2}u_2 - Z_{c1}M_{21}M_{11}^{-1}u_1) = 0 \quad (3.26)$$

将上式两边除以  $Z_{c2}$ ，并记  $Z_c = Z_{c1}/Z_{c2}$ ，得：

$$[m]_x Z_c M_{21} M_{11}^{-1} u_1 = [m]_x u_2 \quad (3.27)$$

式 (3.27) 右边的向量为  $[m]_x u_2 = m \times u_2$ ，可见该向量与  $u_2$  正交，将  $u_2^T$  左乘式 (3.27) 两边，将等到的式两边除以  $Z_c$  后，等到以下重要的关系式：

$$u_2^T [m]_x M_{21} M_{11}^{-1} u_1 = 0 \quad (3.28)$$

式 (3.28) 给出了两幅图像上的对应点之间所必须满足的关系，在给定  $u_1$  的情况下，表示图像平面  $I_2$  上关于  $u_1$  的极线方程，反过来，在给定的  $u_2$  情况下，表示图像平面  $I_1$  上关于  $u_2$  的极线方程。在给定  $u_1$ （或  $u_2$ ）时，极线方程只与矩阵  $M_{11}, M_{21}$  有关。

令  $F = [m]_x M_{21} M_{11}^{-1}$ ，则式 (3.28) 可以写成：

$$u_2^T F u_1 = 0 \quad (3.29)$$

$F$  矩阵在计算机视觉领域有着重要的地位，被称为基本矩阵，基本矩阵给定了一幅图像中的像点在另一幅图像中必须满足的直线方程<sup>[137]</sup>。

### 3.4.3 本质矩阵

设空间点  $P$  在第一个摄像机坐标系下的坐标为  $M(x, y, z)$ ，像点在规一化坐标系下的表示为  $\tilde{m}$ ，在第二个摄像机坐标系下的坐标为  $M'(x', y', z')$ ，像点在规一化标系下的表示为  $\tilde{m}'$ ，则有下列的表达式：

$$\begin{aligned} \tilde{m} &= \frac{1}{z} M \\ \tilde{m}' &= \frac{1}{z'} M' \\ M' &= RM + t \end{aligned} \quad (3.30)$$

其中  $R$  和  $t$  为两个摄像机坐标系之间的相对旋转和平移，在上式中消去

$M, M'$ ，可得：

$$\tilde{m}' = \frac{1}{z'}(zR\tilde{m} + t) \quad (3.31)$$

将上式与向量  $t$  叉乘，再与  $\tilde{m}'$  点乘，可得：

$$\tilde{m}'^T (t \times R\tilde{m}) = 0 \quad (3.32)$$

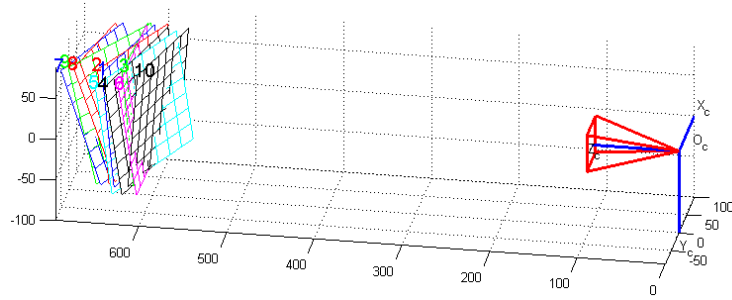
在向量  $t \neq 0$  时，定义  $t$  的反对称矩阵为  $[t]_{\times}$ ，由于  $t \times R = [t]_{\times} R$ ，定义本质矩阵为：

$$E = t \times R = [t]_{\times} R \quad (3.32)$$

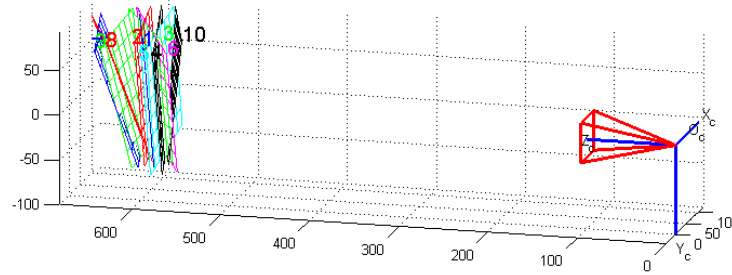
本质矩阵反映摄像机之间的相对旋转和平移，由两摄像机的外参数决定<sup>[137]</sup>。

### 3.5 标定实验

实验中，首先采用 Zhang 的方法对单独的摄像机进行标定，然后应用本文提出了立体标定方法对两个摄像机的外参数进行标定。标定板的方格数为  $9 \times 9$ ，各方格的尺寸为  $20 \times 20\text{mm}$ 。标定过程中，左右摄像机对处在不同位姿的标定板分别采集了 10 幅图像，根据标定所获得的外参数，这些位姿显示为图 3.6 所示的形式，表 3.1 为左右摄像机的内参数标定结果。



(a) 左摄像机外参数显示



(b) 右摄像机外参数显示

图3.6 摄像机外参数标定结果

表 3.1 左右摄像机内参数

参数	左摄像机	右摄像机
$a_x$	2299.35647	2293.27788
$a_y$	2303.85323	2294.70359
$u_0$	661.03181	652.80181
$v_0$	555.13014	564.38570
$k_1$	-0.07479	-0.05642
$k_2$	-0.10337	-0.15154
$k_3$	0.00424	0.00155
$k_4$	0.00350	-0.00524

采用本文方法进行立体标定，根据标定所获得的外参数，两摄像机之间的相对位置可表示为图 3.7 所示的形式。

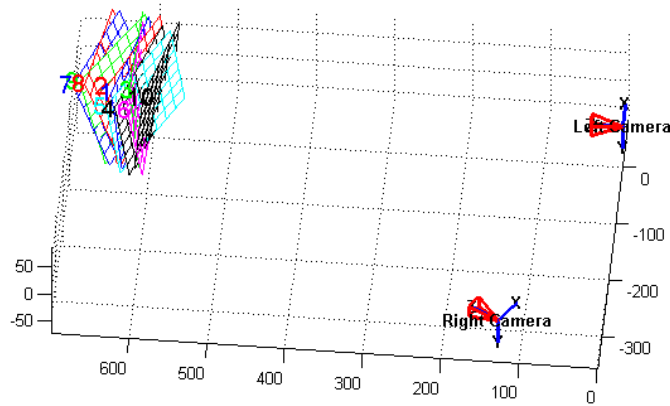


图3.7 摄像机立体标定

两摄像机之间的相对旋转和平移矩阵分别为：

$$R = \begin{bmatrix} 0.853151 & 0.004945 & -0.521641 \\ -0.012260 & 0.999869 & -0.010572 \\ 0.521520 & 0.015415 & 0.853100 \end{bmatrix}$$

$$T = [370.76001 \quad -0.71650 \quad 77.40805]$$

### 3.6 本章小结

本章介绍了线性、非线性摄像机模型及其标定方法。目前的标定方法大多是

针对单个的摄像机分别进行内外参数的标定,由于标定误差的存在,利用两个单独标定的摄像机进行立体视觉测量时,其外参数的误差必然会引起较大的测量误差。针对立体视觉测量系统的需求,本章提出了一种基于三维反求误差最小的立体摄像机标定方法,该方法以对应点视线的公垂线的中点为重建的空间三维标定点,以空间标定点的三维重建误差最小为目标函数,通过迭代计算,重新对双摄像机的相对位置进行标定。本章建立了立体标定模型,并研究了模型的数值化求解方法。

对极几何约束是双目立体视觉中的基本约束,在摄像机标定、图像匹配中都会有所应用,本章对此也作了简单的介绍。

## 第4章 图像特征的精确提取

本章分析了双目视觉测量中对图像处理的特殊要求,通过大量实验对相关的研究成果进行了定量比较,在此基础上设计了有效的图像处理实现策略,对部分算法进行了改进,获得了高精度的图像处理结果。主要包括:棋盘角点的提取、图像中标志点的提取、明暗条纹图像的二值化、被测物体与背景的分割。

### 4.1 图像的预处理

图像的预处理是图像特征提取的基础,它的目的是改善图像数据,抑止不需要的变形或者增强某些对后续处理重要的特征。图像预处理的输入和输出都是亮度图像,从信息理论的角度,预处理一般都会降低图像的信息量。因此,最好的预处理是没有预处理,避免预处理的最好途径是着力于高质量图像的获取。但是由于各种几何和物理因素的影响,图像的预处理不可能完全避免。

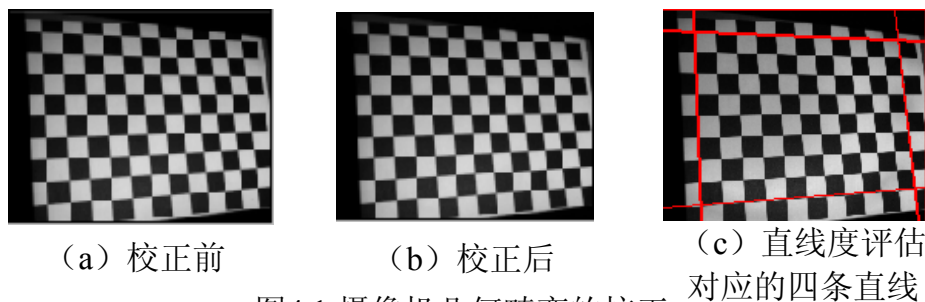


图4.1 摄像机几何畸变的校正

表 4.1 棋盘角点最外围角点进行直线拟合的直线度 (单位: 像素)

角点位置	角点数量	直线度 (校正前)	直线度 (校正后)
第一行	12	0.6299	0.2369
第一列	9	0.5172	0.1334
最后一行	12	0.7534	0.1145
最后一列	9	0.5981	0.3416

在我们的测量系统中,通过对成像条件的控制,图像的预处理仅仅包括对图像几何畸变的校正。对于已标定的摄像机,根据式 (3.11) 与 (3.12) 可以计算出图像点坐标的理想值  $(\bar{x}, \bar{y})$ 。图 4.1 (a) 为原始图形, (b) 为几何畸变校正之

后的图像，(c)显示了进行直线度评估时所选用的四条直线，这四条直线分别由第一行、第一列、最后一行，最后一列的棋盘角点拟合得到；表4.1列出了校正前后四条直线的直线度。经过相机的标定，较好的消除了镜头的几何畸变。

摄像机的非线性畸变参数 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 通常是 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 量级的小数值，这样根据式(3.12)所计算的非线性畸变值 $\delta_x$ 与 $\delta_y$ 含有小数位，为了减小计算理想坐标值的舍入误差，需要进行重采样<sup>[72]</sup>。常用的重采样方法有双线性插值、双三次卷积法和最邻近像元法。图4.2为图像几何校正使用双线性插值与未使用双线性插值时的结果对比（放大八倍），可以看出，未插值的图像有明显的锯齿，而采用了双线性插值的图像相对平滑很多。

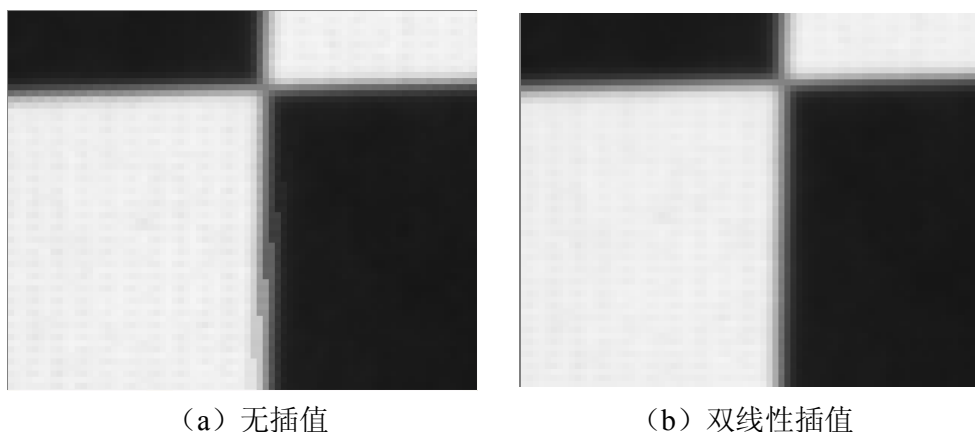


图4.2 双线性插值结果

在立体视觉图像对中，由于极线约束的存在，对应点的搜索只需要在沿极线的二维方向进行。为了进一步提高对应点搜索的速度，人们提出了立体图像的外极线配准，其实质是通过对摄像机的透视矩阵经过一定的几何变换得到新的透视矩阵，使得变换后的立体图像对的极线为互相平行的水平直线，这样对应点的搜索只需要在平行于轴的一维方向进行。这一变换过程被称为图像校正<sup>[139]</sup>。而另一方面，有些研究人员指出图像校正所引起的重采样会造成分辨率的损失，如果精度要求高的话，最好使用普通的立体几何学<sup>[85]</sup>。在实验中，考虑到测量精度是系统的首要要求，因此我们没有进行这种类型的图像校正。

## 4.2 角点检测

在摄像机标定中，使用最多的标定图案是黑白棋盘或离散的方格，通过提取棋盘或方格的角点在图像中的位置信息，与角点在空间的三维坐标一起，可以标



定出摄像机的内外参数。因此棋盘角点的检测精度，直接关系到摄像机标定以及后续三维重建的精度。

### 4.2.1 角点检测概述

文献[96]提出了角点检测的三个标准：（1）一致性要求，包括算法的稳定性和对噪声的敏感性；（2）准确性要求，提取的角点应尽可能的接近实际角点的真实位置；（3）算法的复杂性要求，要求算法的速度、复杂性能满足实时任务的需要，这一点在摄像机标定中不必强求。角点的提取算法主要分为基于模板匹配的方法、基于边缘的方法和基于灰度变化的方法<sup>[97]</sup>。

#### 1、基于模板匹配的方法。

模板匹配法角点检测的原理是，应用给定大小和旋转角度的模板与图像中所有相同大小的子区域进行相似性或相关性计算，认为满足一定阈值要求的子区域存在角点<sup>[98]</sup>。由于角点拥有大量的角度和梯度特征，不可能设计出大量模板来匹配所有类型的角点，因此这类方法的应用受到局限。

#### 2、基于边缘的方法。

基于边缘的方法首先进行边缘检测，接下来沿着所得到的边缘寻找曲率最大点或拐点作为角点<sup>[99]</sup>，或使用多边形拟合边界，把两条边界的交点作为角点<sup>[100]</sup>。由于这类算法依赖于前期的区域分割，而图像分割本身是一个复杂的工作，因此算法的复杂度更高，角点提取的精度受图像分割影响的较大。

#### 3、基于灰度变化的方法。

基于灰度变化的方法，直接利用图像的亮度和对比关系提取提取角点，例如 *susan* 算法<sup>[100]</sup>、基于数学形态学的方法<sup>[101]</sup>，或利用图像灰度的方向导数提取角点，例如 *harris* 算法<sup>[104]</sup>。这类方法利用角点本身的特点直接提取角点，算法速度快、实时性强。其中基于灰度自相关函数的 *harris* 算法具有较高的稳定性，能够在图像旋转、灰度变化以及噪声干扰等情况下准确提取出角点，是目前应用比较广泛的检测方法。

自相关函数描述了图像局部区域灰度的变化程度，可表示为：

$$E(x, y) = \sum_{u, v} w_{u, v} (I_{x+u, y+v} - I_{u, v})^2 \quad (4.1)$$

其中， $E(x, y)$  是由于两个图像窗口偏移  $(x, y)$  而造成的图像灰度的平均变化

量， $w$  是图像窗口， $I$  代表图像的灰度。在角点处，图像窗口的偏移将造成自相关函数  $E(x, y)$  的变化显著，因此可以通过  $E(x, y)$  的变化程度来检测角点。Harris 等人经过推导，证明自相关函数  $E(x, y)$  可以表示为：

$$E(x, y) = [x, y] \cdot M \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

其中，矩阵  $M$  是自相关函数  $E(x, y)$  的近似 Hessian 矩阵，即

$$M = \begin{bmatrix} g_x^2 & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y^2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

其中， $g_x, g_y$  分别为图像在  $x, y$  方向的梯度。

图像灰度自相关函数的极值曲率可以由矩阵  $M$  的特征值近似表示，如果矩阵  $M$  的两个特征值都比较大，说明在该点的图像灰度自相关函数的两个正交方向上的极值曲率均较大，即可认为该点为角点。矩阵  $M$  行列式的值正比于两个正交方向上的极值曲率的乘积，因此 Harris 算法的角点检测函数为：

$$R = \det(M) - k \cdot \text{trace}^2(M) \quad (4.4)$$

其中， $\det(M), \text{trace}(M)$  分别表示矩阵  $M$  的行列式和迹， $k$  为常数。如果某一点的  $R$  值超过给定的阈值，则认为该点是所求的角点。根据 Harris 的建议<sup>[105]</sup>， $k$  取 0.04 能够获得比较好的效果。

#### 4.2.2 亚像素角点提取

从 Harris 算法的处理过程可以看出，其检测精度只能达到像素级别。为了提高角点提取的精度，本文以 Harris 算法的初值为基础，进一步进行亚像素的角点提取。

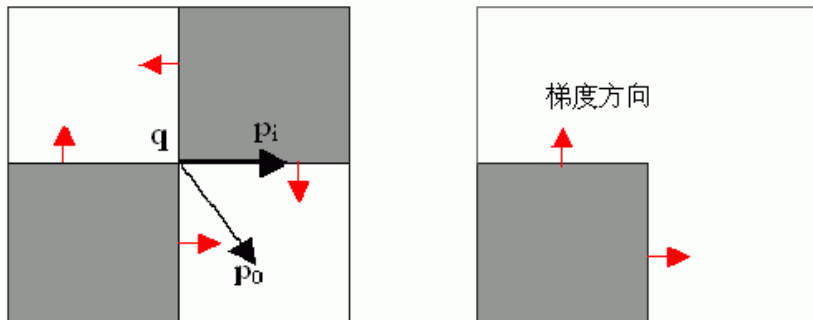


图4.3 亚像素方法角点提取的原理

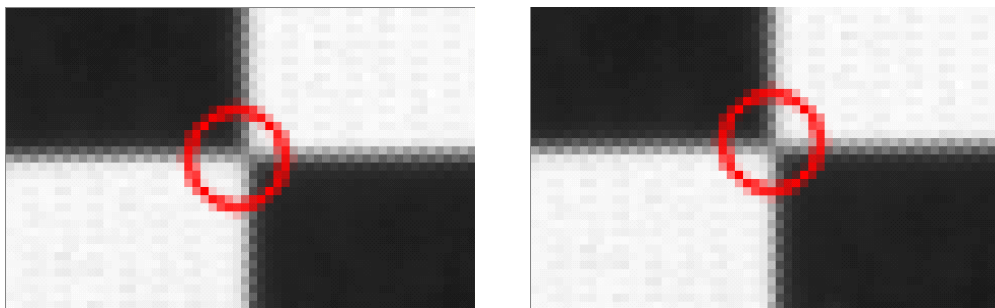
如图 4.3 所示, 假设角点的精确位置在  $q$  点, 则从  $q$  出发指向其领域  $p_i$  的向量都与  $p_i$  处的图像灰度垂直。但由于噪声的存在, 这两个向量不严格垂直, 如图中的向量  $\overrightarrow{qp_0}$  所示, 用代数表示为:

$$\varepsilon_i = g_{p_i} \cdot (q - p_i) \quad (4.5)$$

其中  $g_{p_i}$  为  $p_i$  点处图像的灰度梯度,  $q$  为使得  $\varepsilon_i$  值最小的图像点坐标, 在求解  $q$  的过程中, 可以假设  $\varepsilon_i = 0$ 。这样上式可以改写为:

$$g_{p_i} \cdot q = g_{p_i} \cdot p_i \quad (4.6)$$

将含有 Harris 角点的某个区域的所有  $p_i$  点的方程联立, 得到一个关于  $q$  的方程组, 方程组的解即为  $q$  点的坐标值。以新的  $q$  点为区域的中心, 继续应用上述方法进行迭代计算, 直到  $q$  的变化小于指定的阈值。图 4.4 为使用 Harris 算法和亚像素角点提取方法的结果对比 (放大 8 倍), 图中各圆的圆心为提取的角点位置。图 (a) 中圆的圆心相对于角点存在明显的偏移 (偏向左下方), 而图 (b) 中的圆心更接近于角点。通过采用亚像素的角点提取方法, 所获得的角点更接近于实际位置。



(a) 像素精度

(b) 亚像素精度

图4.4 亚像素方法角点提取的结果

## 4.3 标志点的提取

### 4.3.1 标志点的形状及特性

在摄影测量领域, 人工标志点是图像拼接、测量数据拼接等的重要依据, 在工程中具有很高的应用价值。根据标志点的形状、发射特性和识别原理等可分为不同的类型。图 4.5 所示是几种不同形状的标志点, 其中第一行为普通标志点,

第二行为编码标志点，具有编码的标志点通过图像处理、特征提取和识别，可以被唯一的标识<sup>[107]</sup>。根据标志点的发射特性来看，可以分为一般发射类型和回光发射类型，后者采用特殊材料制成<sup>[106]</sup>，其成像亮度高而清晰，可以快速、准确而可靠的定位。

在应用中，标志点的设计和选择要考虑两项最基本的要求：首先，标志点要以适宜的尺寸成像，太小不易提取，测量结果中会存在大面积的空白；其次，标志点要易于识别和提取，测定其特征点坐标时显示精确的结果。

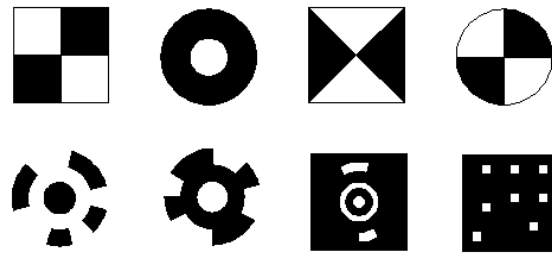


图4.5 各种形状的标志点

在本系统采用黑白相间的圆环作为标志点，如图 4.5a 所示，其中心和四周的颜色有很大的反差。由于摄像机成像过程中的射影变形，实际所获得的图像变成椭圆环，如图 4.5b 所示。为了对椭圆的中心进行精确的定位，首先对图像进行边界提取，然后对长度在一定范围内的边界进行椭圆的最小二乘拟合。

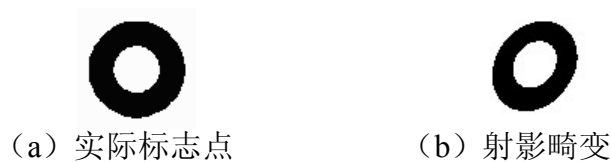


图4.5 标志点及其畸变

边界检测是数字图像处理中的基本问题，有很多经典的方法可以实现数字图像的边界提取，如 Sobel 算子、Prewitt 算子、LoG 算子和 Canny 算子等<sup>[94]</sup>。这些都是经典的微分法，具有很强的适用性，但算法本身受噪声的影响比较大或者对边界的提取具有一定的方向性。由于图像采集的过程中可以很好的控制实际图像的质量，因此我们可以获得较好的二值化图像，然后采用形态学的边界提取方法获取椭圆环的边界点。通过对椭圆边界的提取，可以准确的获得标志点的中心。图像的二值化将在下节详细介绍。

### 4.3.2 形态学边界提取

形态学是分析几何形状和结构的数学，是建立在集合代数基础上，用集合论方法定量描述几何结构的科学，它以非线性代数工具，利用点集的性质、积分几何的结果和拓扑学等，对点集以及它们之间的连通性和形状进行研究。而非形态学的图像处理方法类似于微积分，基于逐点展开的函数概念和诸如卷积的线性变换，对图像进行处理。在形状分割、物体量化描述（面积、周长等特征）等领域，形态学方法通常有更好的结果和更快的速度。

最基本的形态学操作是膨胀（Dilation）和腐蚀（Erosion），它们都不是可逆运算，由这两个变换可以定义更多的形态学操作，如开操作、闭操作、击中或击中不中变换等。膨胀对集合元素采用向量加法，将两个集合合并，定义为：

$$A \oplus B = \{\omega \in Z^2 \mid \omega = a + b, a \in A, b \in B\} \quad (4.7)$$

其中， $A, B$  是  $Z^2$  中的集合，图 4.6 (a) 是一个图像膨胀的简单例子。

图像腐蚀对几何元素进行向量减，将两个集合合并，腐蚀是膨胀的对偶操作，定义为：

$$A \ominus B = \{\omega \in Z^2 \mid \omega + b \in A, b \in B\} \quad (4.8)$$

其中， $A, B$  是  $Z^2$  中的集合，图 4.6 (b) 是一个图像腐蚀的简单例子。

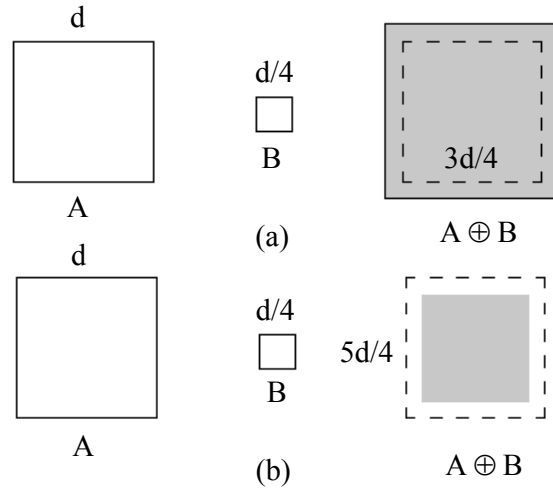
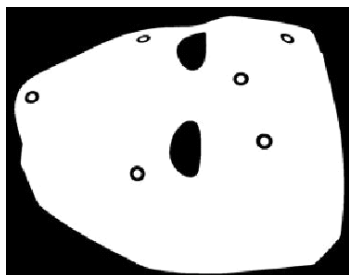


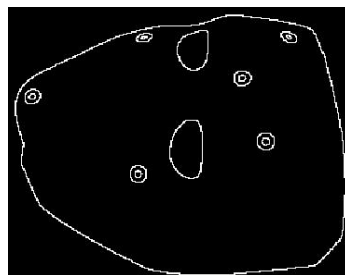
图4.6 基本的形态学操作

处理二值图像时，对形态学基本操作进行简单的组合，就可以实现图像边界的提取。集合  $A$  的边界表示为  $\beta(A)$ ，它可以通过先由  $B$  对腐蚀  $A$ ，然后用  $A$  减去腐蚀等到，即

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (4.9)$$



(a) 二值化图像



(a) 边界提取

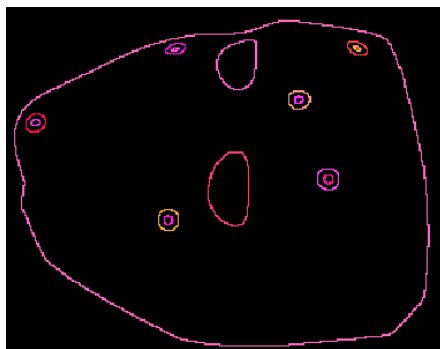
图4.7 形态学边界提取

图 4.7 是对二值化的图像进行边界提取的结果，这里  $B$  采用  $3 \times 3$  大小的结构元素。

### 4.3.3 边界跟踪

边界提取后的图像中包括有一系列的边界，其中既有标志点的边界也包括整个被测物体的外边界，有时还会存在一些由于噪声引起的离散像素点集，并且各个边界并没有被唯一的表示。

为了准确的获取标志点的每一条边界所包含的实际像素，并剔除其它类型的



边界，我们提出改进的扫描线算法进行边界跟踪。基本的扫描线算法<sup>[140]</sup>如下所述：对图像进行逐行扫描，如果遇到某一点为新的边界点，则对该点应用边界跟踪算法，并以链码形式记录所有的边界点。每一条边界都有一个唯一的编号，记为  $NBD$ ，边缘跟踪算法对访问到的每一个边界点以  $NBD$  或  $-NBD$  进行标识。如果当前边界点的右侧点的灰度值为 0，并且左侧点的灰度值为 255，则该边界标识为  $-NBD$ ；否则，该边界点标识为  $NBD$ 。

采用该算法可以得到图像中所有的边界点集，但不能消除其中的孤立像素点

或像素点集，本文对该算法作了一些改进。算法在进行边界跟踪的同时，累计当前边界中像素点的数量，记为  $NUM$ ；在每一条边界跟踪完成后，如果  $NUM$  小于或大于给定的阈值，则认为该边界是由噪声引起或属于它类型的边界，应消除该边界。图 4.8 所示为采用扫描线算法，并进行边界长度检测之后所获得的实际边界，各条边界用不同的颜色表示。这里出于显示效果方面的考虑，暂时保留人脸模型的外边界及中间的眼睛部分。

#### 4.3.4 中心提取

如图 4.5 (b) 所示，圆环形标志点的实际图像为椭圆环，所有需要对各边界点进行椭圆的最小二乘拟合，以获取其中心。椭圆的一般方程[]为：

$$x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0 \quad (4.10)$$

其中， $B, C, D, E, F$  为椭圆方程中的待定系数。将上式进行变量分离，并以矩阵形式表示：

$$\begin{bmatrix} 2xy & y^2 & 2x & 2y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix} = x^2 \quad (4.11)$$

对边界中的每一个像素点，可以得到一个形如式 4.11 的方程，采用最小二乘法可以获得五个待定参数的值。椭圆中心  $(x_0, y_0)$  的计算公式如下：

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{BE - CD}{C - B^2} \\ y_0 &= \frac{BD - E}{C - B^2} \end{aligned} \quad (4.12)$$

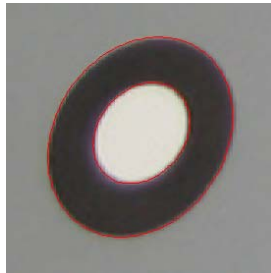


图4.9 椭圆拟合

采用上述方法，每一个椭圆环的内圈和外圈分别可以获得一个中心点，通过对各中心点的距离进行计算，当某两个中心点的距离小于给定的阈值时，认为它们是同一椭圆环的中心，通过线性平均来获得标志点的中心位置，图 4.9 所示为对标志点椭圆拟合的结果。

为了抑止图像噪声的影响从而提高定位精度，可对边缘进行二次拟合，即去掉残差较大的边界点，对剩余点重新进行椭圆拟合。

## 4.4 光栅编码图像的二值化

为了获得被测物体在空间的三维坐标，本文采用立体视觉与编码结构光相结合的办法。编码结构光为一系列有规律的黑白相间的明暗条纹，被测物体被这些条纹分成很多个小单元，但由于各单元的表面方向、反射率等各不相同，一种可能的情况是暗条纹所对应的图像灰度值比某些亮条纹的灰度值还有大，如采用常规的二值化方法易出现条纹断裂、信息丢失等现象，因此为了正确的获取各条纹的空间编码，有必要对光栅图像的二值化作专门的研究。

### 4.4.1 二值化概述

图像二值化是输入图像  $f$  到输出图像  $g$  的如下变换：

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & f(i, j) \geq T \\ 0 & f(i, j) < T \end{cases} \quad (4.13)$$

其中  $T$  是阈值，阈值是把图像和背景区分开的标尺。

图像二值化的目的是按照灰度级，对像素集合进行划分，得到的每个子集形成一个与现实景物相对应的区域，每个区域内部具有一致的属性，而相邻区域不具有这种一致性。这种划分可以通过从灰度级出发选取一个或多个阈值来实现，选择正确的阈值是图像二值化成功的关键。在过去的几十年里，众多的国内外学者对此进行了广泛的研究，产生了众多的阈值选择方法，但没有一种方法能够对各种各样的图像都等到令人满意的结果。一般情况下，阈值的确定可以看作是对图像中点的灰度、该点的某种局部特性以及该点在图像中位置的一种函数，记作：

$$T = T(x, y, N(x, y), f(x, y)) \quad (4.14)$$



其中,  $f(x, y)$  是点  $(x, y)$  的灰度,  $N(x, y)$  是点  $(x, y)$  的局部领域特性。

根据阈值函数的不同约束, 现有的图像二值化方法大致可分为三类: 全局阈值法、局部阈值法和动态阈值法。

### 1、全局阈值法

全局阈值根据经验或图像的灰度分布为整幅图像确定一个阈值, 阈值的确定只与点的灰度信息有关, 其对应的阈值函数可表示为:

$$T = T(f(x, y)) \quad (4.15)$$

这类方法的经典算法包括直方图法<sup>[109]</sup>, 该方法首先对图像的灰度分布进行直方图统计, 然后选取两峰之间的波谷处作为阈值; p-tile 法<sup>[110]</sup>根据目标与背景的像素比例是否等于其先验概率来确定阈值; Otsu 提出的大津法<sup>[111]</sup>, 根据目标类与背景类之间的最大类间方差确定最佳阈值; 熵方法<sup>[141]</sup>将 Shannon 信息熵的概率应用到图像二值化, 矩量保持不变法<sup>[142]</sup>认为图像二值化前后的矩量保持不变。



图4.10 直方图确定整体阈值

这一类算法对成像条件较好、变化较小的图像效果明显, 但由于全局阈值只考虑整体像素的平均灰度, 没有顾及每个像素的不同之处, 所以在光照不均或有噪声较多的情况其效果达不到后续工作的要求。图 4.10 (a) 为编码结构光的局部放大图, 所选择区域为人脸的鼻子部分; (b) 为全图的直方图分布; (c) 为直方图法二值化之后的结果, 阈值选取 128。可以看出, 由于鼻尖部分的曲面变化比较剧烈, 二值化之后的图像并没有准确的反映编码光栅的实际宽度。

### 2、局部阈值法

局部阈值的选择一般将图像划分为若干个子图, 根据每个子图确定其相应的阈值, 各子图阈值的确定方法与整体阈值类似, 其对应的阈值函数可表示为:

$$T = T(N(x, y), f(x, y)) \quad (4.16)$$

这类方法的典型代表有 **Bernsen** 算法<sup>[113]</sup>，其阈值由考察点邻域的灰度确定，但是当邻域窗口尺寸太小时很容易出现伪影像或目标丢失，而窗口尺寸太大时，算法的速度受到很大影响；二维熵阈值分割法<sup>[114]</sup>使用灰度级和局域平均灰度级形成二维灰度直方图进行阈值选择。这类算法由于考虑了像素邻域的相关特性，因此对噪声具有一定的抑止作用。

### 3、动态阈值法

动态阈值法也称自适应阈值化算法，动态阈值的选择充分考虑了像元的邻域特征，能够根据图像的不同背景情况自适应的改变阈值，可较精确的对图像进行二值化，其对应的阈值函数如式 4.14 所示。

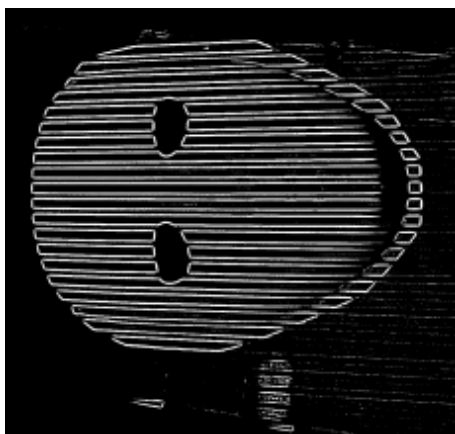


图4.11 自适应二值化

这类方法的典型算法有阈值插值法<sup>[116]</sup>，它将图像分成一系列的子图，然后对每个子图确定一个局部阈值，通过对这些子图确定的阈值进行插值，等到原图中每个像素的合理阈值；基于局部梯度最大值的插值方法，首先平滑图像，并求得具有局部梯度最大值的像素点，然后利用这些像素点的位置和灰度在图像内插值，等到各像素的阈值。典型的动态阈值法还有 **White** 和 **Rohrer**<sup>[117]</sup>的加权移动平均阈值方法，**Perez** 和 **Gonzalez**<sup>[118]</sup>的提出一种迭代的阈值计算方法，适用于非均匀照射下的图像局部阈值方法等。

动态阈值方法对图像中的每个像素点都计算阈值，计算量较大，运算速度一般比较慢，并且它会过渡地夸大像素点领域灰度的变化，把不均匀灰度分布的边界分割到目标中去。图 4.11 是对图 4.10 中原始图像采用加权移动平均阈值方法二值之后的结果，可以看出二值化之后的图像存在明显的噪声。

#### 4.4.2 基于灰度校正的二值化

二值化之后的光栅编码图像，应精确地反映光栅条纹在被测物体表面的实际分布情况，常规的图像二值化方法都很难达到系统的应用要求。在对光栅图像系列认真分析的基础上，我们提出了基于灰度校正的图像二值化方法。

测量过程中，被测物体上的每一个物点至少有一个明条纹和一个暗条纹落在上面，它对应像素的灰度值序列上至少有一个灰度值较大的点和一个灰度值较小的点。这样物点反射率、方向等引起的灰度不均匀通过对像点灰度值的线性校正实现规范化，灰度线性校正的公式为：

$$I_{in} = (I_i - I_{i0}) \cdot grayScale$$

$$grayScale = \begin{cases} 0 & I_{i1} - I_{i0} \leq 0 \\ 255 / ((I_{i1} - I_{i0})) & I_{i1} - I_{i0} \neq 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

其中， $I_i, I_{in}$  分别为像素点  $i$  校正前和校正后的灰度值， $I_{i1}, I_{i0}$  分别为物点被明条纹和暗条纹照射时的灰度值。

图 4.12 (a)、(b) 分别为光栅图像灰度校正前后的局部放大图，可以看出，在校正后的灰度图像上，明暗条纹的对比更加明显。灰度校正后，图像二值化的阈值为明、暗条纹灰度值的均值，用公式表示为：

$$T_i = (I_{i1} + I_{i0}) / 2 \quad (4.18)$$

图 4.12 (c) 为图像二值化之后的局部图像。对比图 4.10 (c)，可以看出采用本文方法所获得的二值化图像，其黑白条纹的宽度更均匀、边界更整齐。

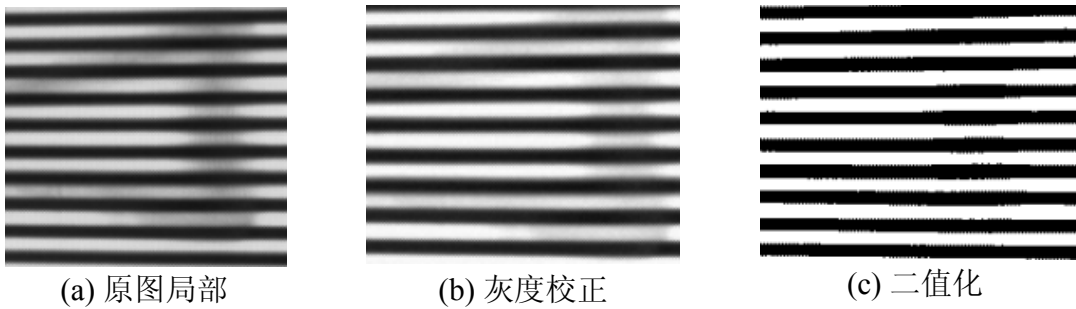


图4.12 图像的灰度校正

#### 4.5 区域分割

在测量的过程中，被测物体需要用某种方式支撑和固定，这样测得的数据即

含有关于被测物体的有效数据，也有关于支撑物的无效数据。为了提高系统的计算速度，同时较少后续的工作，在测量的过程中需要通过图像分割来去除支撑。另外，支撑物对光线的散乱反射也是编码图像二值化过程中的主要噪声，通过图像分割可以在二值化之前有效地去除可能的噪声源。

本文针对彩色、黑白摄像机所获取的图像，分别采用了基于颜色的区域分割和基于纹理的区域分割。

### 4.5.1 基于颜色的区域分割

颜色特征是物体表面的本质特征之一，计算机视觉系统所获得的颜色信息决定于物体本身的光谱反射率、环境光照、视角方向以及传感器的特性等<sup>[143]</sup>，如何从采集到的颜色信息中尽可能的剔除与物体颜色无关的因素，抽取出关于物体颜色特征的稳定的描述，是基于颜色的物体识别和图像分割的首要任务，这涉及到颜色模型和颜色测度等基础问题。因此必须选择合适的颜色模型和相应的识别参数。

颜色模型又称颜色坐标系或颜色空间，是颜色在三维空间中的排列方式。根据不同的硬件和应用，现在已经建立了多种颜色模型，包括用于彩色显示器和摄像机的 RGB（红、绿、蓝）模型；针对彩色打印机的 CMY（青、深红、黄）、CMYK（青、深红、黄、黑）模型；基于主观感受的认知颜色模型 HIS、HSV、LHS 等；CIE 推荐的 CIELAB 和 CIELUV 颜色空间；应用于彩色电视系统的近似正交的 YUV(PAL TV)、YIQ(NTSC TV)颜色模型；Ohta 提出的颜色分量之间完全独立的  $I_1 I_2 I_3$  颜色模型等。

实际中最通用的面向硬件的模型是 RGB 模型，现有的摄像机等图像采集设备最初采集的颜色信息是 RGB 值，颜色显示设备最终使用的也是 RGB 值，图像处理中使用的其它颜色模型也从 RGB 颜色模型转化而来的。RGB 颜色模型是基础的颜色模型，但实验表明，对同一颜色属性的物体，设备采集到的 RGB 值很容易受到环境光强和物体明暗的影响，两个颜色点的知觉差异不能表示为该颜色空间中两个色点之间的距离，实际获得的颜色 RGB 值在颜色空间所占的比例非常大，很难确定 RGB 值的阈值范围；并且 RGB 值之间存在高相关性（B-R: 0.78, R-G: 0.98, G-B: 0.94），对图像中的颜色处理也形成了挑战。

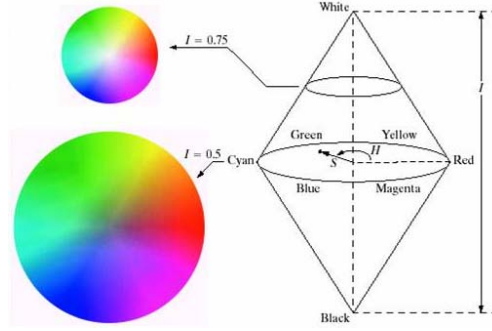


图4.13 圆形彩色平面的HSI模型

针对 RGB 颜色模型不均匀、不直观的缺点，根据人观察彩色物体的主观感受，研究者建立了 HSI 模型，利用颜色的色调（Hue）、色饱和度（Saturation）和亮度（Intensity）特性来区别颜色。其中色调是颜色刺激的主波长，反映了人们对颜色种类的感受；饱和度相当于颜色刺激的纯度，表示一种纯色被白光稀释的程度的度量；亮度是色彩明亮度的概论，反映人眼对颜色强弱程度的感受。HIS 模型的优点是可在彩色图像中从携带的彩色信息（色调和饱和度）里消去强度分量的影响，这样，HSI 模型对于开发基于彩色描述的图像处理方法是一个理想的根据。图 4.13 给出了圆形彩色平面的 HSI 颜色模型，其中的黑点是一个任意彩色点，与红轴的夹角给出色调，向量的长度是饱和度，在该平面中，所有彩色的强度由平面在垂直强度轴的位置给出。文献<sup>[94]</sup>对 HSI 模型进行了详细的描述，以下仅仅给出从 RGB 到 HSI 模型的转换公式：

$$\begin{aligned}
 H &= \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases} \\
 S &= 1 - \frac{3}{R + G + B} \cdot \min(R, G, B) \\
 I &= \frac{1}{3}(R + G + B) \\
 \theta &= \arccos \left\{ \frac{0.5[(R - G) + (R - B)]}{(R - G)^2 + (R - G)(G - B)^{1/2}} \right\}
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

文献[119]对几种颜色模型作了深入的研究，指出 HSV 模型中的 H、S 分量受环境光照、物体的形状以及视环境的影响较小，可以选作颜色相似性度量的基本参数。陶霖密、徐光祐等基于颜色方面多年的研究经验，指出为了降低颜色向量量化的复杂度，对 HSV 颜色空间可作如下的量化：

色调：蓝、紫、红、黄、绿、青

饱和度：高、低

亮度：小、次小、中、次大、大

基于以上分析，我们选用 HSV 作为图像分割的颜色模型，H、V 作为相似性度量的基本参数，采用如下形式的相似性度量：

$$D = |I_{WH} - I_{0H}| + |I_{WS} - I_{0S}| \quad (4.20)$$

其中， $I_{WH}, I_{WS}$  是任意像素点的色调、饱和度分量， $I_{0H}, I_{0S}$  是感兴趣像素点的色调、饱和度分量。为了消除噪声等的影响，以上各分量可取一定窗口范围内的平均值。

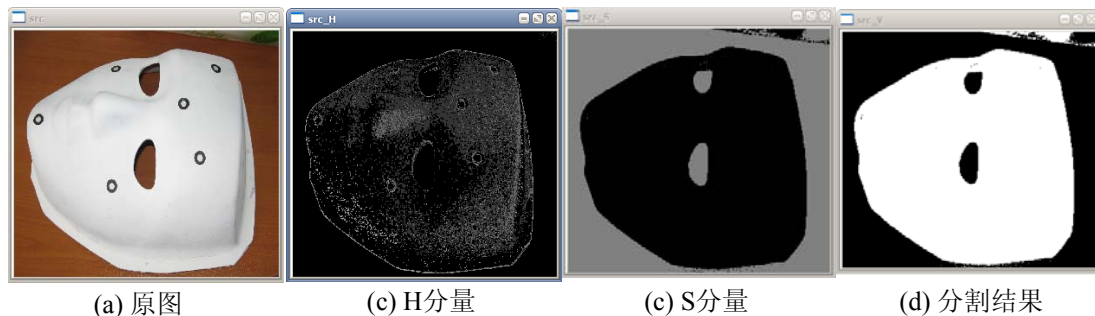


图4.14 HSV空间颜色分割

应用上述模型，我们对测量过程中摄像机获取的彩色图像进行了颜色分割，图 4.14 为颜色分割的结果。其中 (a) 为原始图像，(b)、(c) 分别为原图的 H、S 分量的灰度显示，(d) 为颜色分割的结果。这里相似性度量的阈值取为  $0.2I_{0H} + 0.2I_{0S}$ ，各分量的计算采用  $3 \times 3$  窗口内的算术平均值，选择图像中心大小为  $15 \times 15$  的窗口为兴趣点。可以看出分割明显去除了颜色不同的背景，右上角存在小面积的缺陷，可以在原始图像的二值化操作中消除。

### 4.5.2 基于纹理的区域分割

纹理通常指的是二维空间变化的灰度所组成的图案，是一种反映像素灰度的空间分布属性的图像特征<sup>[121]</sup>。一般来说，被测物体与支撑物在纹理特征上有很大的区别，因此对于黑白摄像机所获取的灰度图像可以采用基于图像纹理特征的方法进行分割。

在图像处理中用于描述区域纹理的方法主要有结构化方法和统计方法。结构化方法的基本思想是：借助限制图元可能的排列数规则，一个简单的纹理图元可

以组成更为复杂的纹理模式。纹理的描述包括纹理图元的描述和空间关系的描述，因此纹理必须是可分割的，纹理图元之间的空间关系必须是能有效计算的。Tuceryan<sup>[122]</sup>提出了一种好的基于几何描述的方法，纹理图元可以通过一些简单的步骤如阈值化等抽取，纹理图元间的空间关系根据纹理图元的 Voronoi 图等到。McCorminck 等也曾在这方面做过一定的努力，并发展为应用形式语言和纹理谱等概论进行纹理描述，在人工图像描述方面取得一定成果。由于结构化方法必须定义纹理图元和图元的空间关系，该方法适用于图元排列比较规则的人工图案。

统计方法是指用数学统计和转换的方法对图像的空间信息进行统计，得到诸如平滑、粗糙、粒状等纹理的特征描述，并利用这些特征表示不同的图像。共生矩阵法<sup>[123]</sup>是最常用的统计方法，它利用像素在空间上排列的相关性，根据图像像素间方向和距离构造一个共生矩阵，然后从共生矩阵中提取纹理测度来表述纹理特征。Tamura 纹理特征<sup>[124]</sup>是在人类视觉对纹理特征辨别的心理学实验推动下，推出了一种心理学中重要的纹理特征计算方法，利用粗粒度、对比度、方向性、似线性、规则性和非光滑性等六个参数来表征图像的纹理。统计方法适应于分析纹理细密而且不规则的图案。

由于测量中的背景和支撑物多属于不规则的自然场景，本系统采用统计学的 Laws 纹理能量测度<sup>[125]</sup>进行纹理分割。Laws 利用局部模板来检测不同类型的纹理，模板根据下面的向量算出：

$$\begin{aligned} L5 &= \{ 1 \quad 4 \quad 6 \quad 4 \quad 1 \} \\ E5 &= \{ -1 \quad -2 \quad 0 \quad 2 \quad 1 \} \\ S5 &= \{ -1 \quad 0 \quad 2 \quad 0 \quad -1 \} \\ R5 &= \{ 1 \quad -4 \quad 6 \quad -4 \quad 1 \} \end{aligned}$$

其中， $L5$  向量表示加权中心的局部模板均值， $E5$  向量检测边缘， $S5$  向量检测点， $R5$  向量检测波纹。计算向量对的外积，得到二维模板，例如，模板  $E5L5$ ：

$$E5L5 = \begin{bmatrix} -1 \\ -2 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \\ -2 & -8 & -12 & -8 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 8 & 12 & 8 & 2 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

Laws 纹理能量测度算法的基本步骤如下：

1、图像预处理，通过在图像上移动一个小窗口，从每个像素中减去窗口的灰度均值，得到每个邻域内平均灰度接近 0，消除亮度不均匀的影响。

2、用 16 各  $5 \times 5$  的模板对预处理后的图像进行滤波，得到 16 幅经过滤波的能量图像。设  $F_k[i, j]$  是像素点  $[i, j]$  用第  $k$  个模板滤波的结果，则滤波器的纹理能量图  $E_k$  定义如下：

$$E_k(r, c) = \sum_{i=r-7}^{r+7} \sum_{j=c-7}^{j+7} |F_k[i, j]| \quad (4.21)$$

3、16 幅能量图像进行组合，消除对称对，得到 9 个图像，每个组合的能量值用它们的均值代替。9 个合成的能量图是：

$L5E5/E5L5$

$L5S5/S5L5$

$L5R5/R5L5$

$E5E5$

$E5S5/S5E5$

$E5R5/R5E5$

$S5S5/S5R5$

$R5S5/S5R5$

$R5R5$

经过以上处理后，原始图像的每个像素点对应为一个含有 9 个纹理特征的向量描述。

为了简化计算，纹理相似性的度量采用街区距离：

$$\rho(x, y) = \sum_{i=1}^9 |x_i - y_i| \quad (4.22)$$

其中，特征向量  $\{x_1, \dots, x_9\}$  为任意像素的纹理特征， $\{y_1, \dots, y_9\}$  为感兴趣像素的纹理特征。

图 4.15 为采用 Laws 纹理能量测度对摄像机获取的灰度图像进行纹理分割的结果，其中 (a) 为原图，(b) 分割结果，(c) 为 Laws 纹理能量测度算法中第 3 步所获得的 9 个能量图，表 4.2 为背景及测量对象的 Laws 纹理能量测度。

表 4.2 图像的 Laws 纹理测度

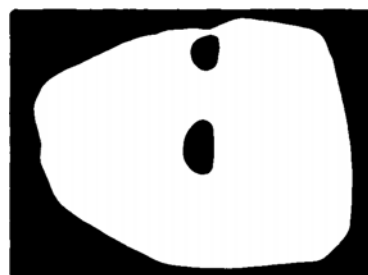
能量测度	背景	测量对象
$L5E5/E5L5$	26.2926	23.6828
$L5S5/S5L5$	16.0561	15.3803
$L5R5/R5L5$	17.494	18.528



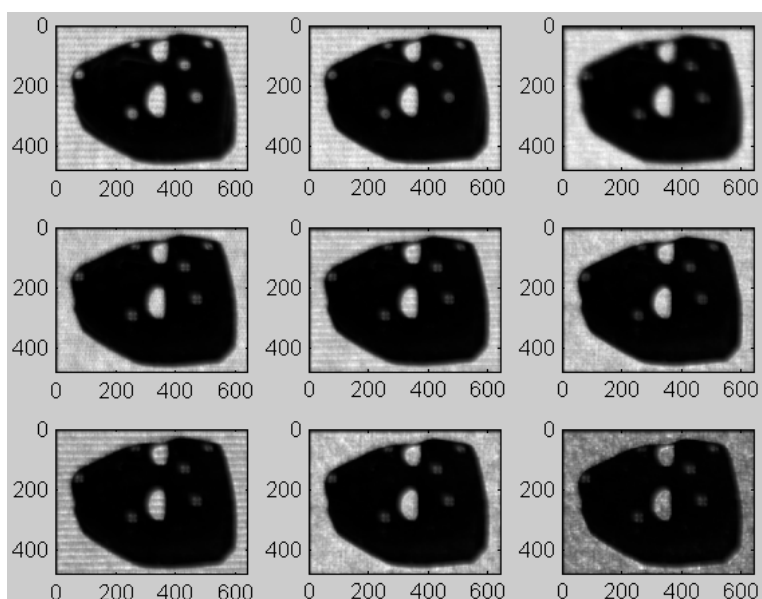
<i>E5E5</i>	7.6764	7.5261
<i>E5S5/S5E5</i>	4.8276	4.7258
<i>E5R5/R5E5</i>	10.0131	8.4088
<i>S5S5/S5R5</i>	3.0093	2.9250
<i>R5S5/S5R5</i>	6.3470	5.5694
<i>R5R5</i>	15.4841	14.8873



(a) 原图



(b) Laws纹理分割



(c) 9个合成的能量图

图4.15 Laws纹理分割

## 4.6 本章小结

根据系统开发的需要，本章重点研究了几种图像基本特征分析和提取方法，包括：棋盘角点的提取、标志点的提取、光栅编码图像的二值化和图像的区域分割。棋盘角点的提取对摄像机的标定精度有着直接的影响，本章采用了一种亚像素的角点提取方法；标志点的提取是测量数据拼接的基础，本章采用形态学方法

提取标志点的边界，通过边界点的椭圆拟合提取标志点的中心位置；二值化的光栅图像反映的编码光栅对测量表面的实际编码情况，本章提出了一种基于灰度校正的图像光栅图像二值化方法，并取得了较好的效果；为消除测量过程中背景及支撑物对图像二值化的影响，同时减少后续数据处理的工作量，本章通过图像分割有效的去除了测量过程中的非测量区域的影响。应用实例证明了这些方法的有效性。

## 第5章 估计初值的宽基线图像匹配

三维重建的先决条件是建立各图像中图元的对应关系，即立体匹配。然而实际获取的图像往往包含数百万的像素，同时又有几万个图像特征，并且由于噪声、畸变等引起的干扰也综合反映到获取的图像中，因此要准确的对图像进行匹配是非常困难的，必须设计一些方法来建立正确的立体匹配，以避免三维重建的错误。通过对现有匹配方法的分析，本章提出一种由粗到细的两步方法实现立体图像对的精确匹配，并应用二叉树对图像系列进行存储和搜索，提高了图像匹配的速度。

### 5.1 图像匹配中的基本约束

立体匹配的研究可以归纳为两个方向，两个方向的研究成果都为立体匹配的实现提供了一些基本的约束。

一个方向是从理解人类视觉的立体融合机制出发，从心理学、生物学领域进行研究，试图建立一种通用的人类双目视觉计算模型，以此来指导机器视觉系统的立体匹配。尽管构造出一个与人类视觉系统一样灵活的机器视觉系统比较困难，但该方向的研究已经为立体匹配提供了一些有意义的指导。Julesz<sup>[62]</sup>指出：人类双目融合的过程不能用直接和实际视网膜相联系的外围过程（子过程）来解释，相反它涉及中枢神经系统和一个想象中的超视网膜，这个视网膜将左右眼的激励结合成单一的整体。Julesz 提出的立体视觉的偶极理论模型是一种按照协作方式工作的方法，相邻的匹配互相影响以避免二义性并促成对场景的全局分析。Marry 和 Poggio<sup>[62]</sup>提出的方法也是按照协作方式工作。他们的方法依靠三个约束：

#### 1、一致性约束

两幅图像上的像素或特征（称基元）只有来自同一类物理特征才能匹配。

#### 2、唯一性约束

一般情况下，一幅图像上的一个基元最多只能与另一幅图像中的一个基元相匹配。

#### 3、连续性约束

物体表面一般是平滑的，相邻点的视差也应该是连续的，该约束限制了寻找对应点时的搜索长度。但是在物体的边界或深度不连续的地方，该假设不成立。

立体匹配的另一个研究方向是从计算机视觉领域的实际应用和要求出发，致力于建立适用于专门领域和面向对象的立体视觉系统，针对场景的特点和应用要求，通过附加某些先验知识建立一些特定的匹配约束，以降低立体匹配的难度<sup>[64]</sup>。

### 1、相似性约束

从几何的角度，两幅图像中对应的几何特征的特性相差不大；从物理光度学的角度，两幅图像中对应像素的灰度相差不大。

### 2、极线约束

一幅图像上的任一点，它在另一幅图像上的对应点只能位于一条特定的称之为极线的直线上。极线约束将对应点的搜索从二维降低到一维。

### 3、次序约束

对于深度相似的表面，对应的图元一定以相同的顺序落在极线上。但如果一个细长的物体比其背景距离摄像机近的多，该假设可能不成立。

### 4、互对应约束

从图像上的一个点，可以在另一幅图像上找到一个对应点；反过来，从另一幅图像上的对应点，应该找到原来的点；否则该匹配就是不可靠的。互对应约束有助于排除由于遮挡、高光或噪声等原因而不存在对应的那些点。

## 5.2 图像匹配算法分类

任何一种立体匹配方法，都必须解决以下三个问题：

(1) 基元选择：选择合适的像素或图像特征作为匹配基元，如点、直线、区域等，选择基元时要考虑基元的敏感性和稳定性。

(2) 匹配准则：根据基元所具有的固有特性，表示为一定的特征向量进行描述，并转换为匹配所必须遵循的若干约束，使匹配结果能真实反映物理对象的本来面目。

(3) 算法结构：根据所选基元，采用适当的数学方法设计能准确度量匹配准则的稳定算法。

关于立体匹配的研究都是围绕着这三个方面在工作，其中基元的选择是最基

本的，它影响着后续匹配准则和算法结构。因匹配基元的不同，它们判断对应点匹配的理论依据也有所不同，同时匹配基元的稳定性、致密性和歧义程度直接决定了各类算法的基本特征。综合可使用的匹配基元，主要包括点特征、线特征和区域特征等，目前的立体匹配算法以此可分为两个主要的大类<sup>[65]</sup>：基于特征的匹配和基于区域的匹配。

### 5.2.1 基于特征的图像匹配方法

基于特征的图像匹配方法使用显著的和易于找到的几何特征为基元进行相似度的比较，常用的几何特征包括边缘轮廓、拐点、几何基元的形状和参数化的几何模型等。例如 Rimon Elias<sup>[73]</sup>利用 Judoca 算子检测角点并应用单应矩阵对任意的平面进行特征匹配，实现空间任意平面的三维重建；David G.Lowe<sup>[74]</sup>提出的 SIFT 算法，首先在尺度空间进行特征检测，并确定关键点的位置和关键点所处的尺度，然后使用关键点邻域梯度的主方向作为该点的方向特征，实现算子对尺度和方向的无关性；B. Herber<sup>[75]</sup>等利用图像中的直线特征对图像分割和匹配，并通过迭代算法获得更多的有效匹配；Carlsson<sup>[76]</sup>提出以直线段间几何关系描述符为基础，通过对不变量的描述符的匹配得到匹配的直线段；肖轶军、丁明跃等<sup>[144]</sup>分析了 Bezier 曲线的仿射不变性，通过从立体图像对中抽取 Bezier 曲线，利用 Bezier 曲线的控制点来重建空间 Bezier 曲线；Kass<sup>[78]</sup>提出能量最小化的 Snake 主动轮廓模型，基于局部连续性和平滑性约束进行特征匹配。

基于特征的匹配方法以特征为匹配基元，因而具有以下优点：

- 1、参与匹配的点（或特征）数量较少，因此速度较快；可能的候选对应较少，因此不确定性较小。
- 2、几何特征的提取可以达到很高的精度，因此特征匹配的精度较高。
- 3、匹配基元是几何特征，因此特征匹配对灰度的变化不敏感。
- 4、物体的几何特征往往出现在视差不连续的区域，因此特征匹配较易处理立体匹配中的视察不连续问题。

同样的，由于这类匹配方法以特征为匹配基元，因此也存在一些不足：

- 1、几何特征本身的稀疏性和不连续性，因此特征匹配只能得到稀疏的几何信息。

2、基于特征的匹配方式需要对两幅图像进行特征提取，相应会增加计算量；特征提取和定位精度直接影响立体匹配结果的精度。

为克服以上不足，研究者提出了一些改进的特征匹配方法，例如特征匹配与区域匹配相结合，通过插值获得致密的匹配<sup>[145]</sup>，提出了各种稳定的特征提取和特征定位方法等，但仍然无法完全克服基于特征的匹配方法的天然不足。在精密测量系统中，要求获得关于被测物体的致密的、准确的数据，因此基于特征的匹配方法不能满足我们的需要。

### 5.2.2 基于区域的图像匹配方法

基于区域的匹配方法应用灰度的相似性约束，通过比较可能的匹配点周围的灰度情况，找出像素级的图像匹配。有很多种方法可以对灰度的相似性进行度量，其中影像相关技术是一种最常用的方法，它是图像统计理论直接在立体匹配中的拓展，并没有很多视觉心理上的解释，最初应用于航空摄影测量领域，一直以来在立体视觉的研究和应用中起着重要的作用，其基本原理如图 5.1 所示。

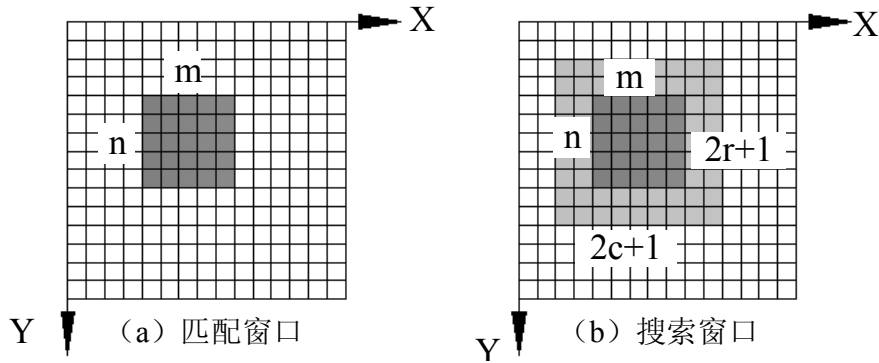


图5.1 影像相关技术

影像相关技术的基本方法包括：相关函数测度、协方差函数测度、相关系数测度、差平方和测度和差绝对值测度等，其中应用最为广泛的是相关系数测度。

相关系数是规一化的协方差函数，对于图像  $I(u, v)$  与匹配  $I'(u, v)$  的相关系数可定义为：

$$\rho(i, j) = \frac{C(i, j)}{\sqrt{C_{ii} \cdot C_{jj}}(i, j)} \quad (5.1)$$

其中， $C(i, j)$  由式 5.2 计算， $C_{ii}, C_{jj}(i, j)$  由式 5.3 计算。

$$C(i, j) = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (I_{u,v} - \bar{I}) \cdot (I'_{u+i,v+j} - \bar{I}'_{i,j}) \quad i \in (-c, c), j \in (-r, r) \quad (5.2)$$

$$C_{II} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (I_{u,v} - \bar{I})^2$$

$$C_{I'I'}(i, j) = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (I'_{u+i,v+j} - \bar{I}'_{i,j})^2 \quad (5.3)$$

由于影像相关技术直接对图像像素进行匹配, 匹配结果不受特征检测精度的影响, 因而可以得到致密的视差表面。但由于对像素邻域内灰度统计特性的过分依赖, 影像相关技术存在以下缺点:

- 1、匹配结果对图像的几何变形、灰度差异等十分敏感。
- 2、区域灰度相关意味着在邻域窗口内的所有像素点具有相同的视差, 对深度不连续的区域容易出现误匹配。
- 3、区域内匹配点的搜索以像素为步长, 匹配精度只能达到像素级; 同时, 匹配精度受邻域内的信噪比影响, 在缺乏足够纹理细节的地方难以实现。
- 4、对每一个像素点的匹配, 需要在搜索区域内的每一个窗口进行, 算法的计算量大。

针对影像相关技术存在的缺点, 出现了各种改进的匹配方法。例如建立像素点之间的候选匹配关系后, 进行对称性测试<sup>[146]</sup>, 只有对应点一致时才视为有效匹配; 对相关系数的抛物线拟合<sup>[69]</sup>, 提高相关匹配的精度; 匹配点的搜索, 在给定区域内采用二分之一或四分之一像素<sup>[147]</sup>, 通过双线性插值获得非整数像素点的灰度值; 采用盒滤波技术<sup>[70]</sup>, 在匹配窗口每次移动后, 仅仅对改变的部分像素重新计算, 减小匹配的计算量; 最小二乘匹配法<sup>[72]</sup>对匹配对象进行灰度和几何变形的校正, 在航空摄影测量中取得了 0.1 甚至 0.01 像素的匹配精度, 下一节会对该方法进行详细的介绍。

除了影像相关技术外, 基于区域的匹配方法还有区域不变矩方法<sup>[148]</sup>, 该方法计算区域的二阶、三阶的归一化中心矩, 并由此组成 7 个对于平移、旋转和比例缩放不变矩, 通过对不变矩向量的度量寻找匹配点; Hausdorff 方法<sup>[149]</sup>采用基于平均距离值的 Hausdorff 距离 (MHD) 作为匹配准则, 通过穷尽搜索的方法, 候选区域进行对应点查找; 区域熵差法<sup>[150]</sup>对像素点的邻域定义局部熵, 通过比较匹配对象之间信息量差异大小进行图像匹配。

### 5.2.3 最小二乘图像匹配

在二十世纪八十年代，德国 Ackermann 教授将最小二乘法应用到图像匹配中。该方法充分考虑了两个匹配窗口之间的几何变形和灰度变化，采用迭代的方法对参数作最小二乘求解，使得两窗口之间的灰度差的平方和最小。

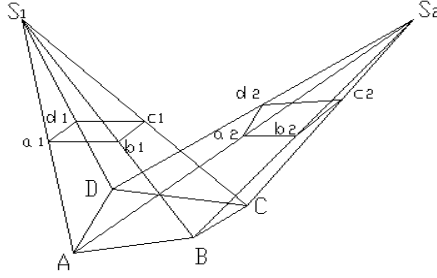


图5.2 几何变形

两个二维图像之间的几何变化变形除了位置的平移，还包括几何形状的射影变形。如图 5.2 所示，左摄像机上的矩形图像窗口，在右摄像机上的对应形状是一个任意的四边形，只有充分考虑图像的几何变形才能获得最佳的匹配结果。由于图像匹配窗口的尺寸很小，因此可以认为各窗口对应的物体表面为平面。如果在各平面上建立欧氏坐标系，则物体表面与各图像平面之间的映射关系可以表示为 6 自由度的透视变换，而两图像平面之间的映射关系可以表示为 8 自由度的射影变换<sup>[137]</sup>。在不考虑  $Z$  坐标的情况下两图像窗口之间的坐标对应关系可表示为：

$$\begin{aligned} x_2 &= a_0 + a_1x + a_2y \\ y_2 &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned} \quad (5.4)$$

其中， $(x, y)$  为左图像上的像素点坐标， $(x_2, y_2)$  为右图像上的像素点坐标。如果再考虑右图像相对于左图像的线性灰度变化，则可表示为：

$$\begin{aligned} g_1(x, y) + n_1(x, y) &= h_0 + h_1g_2(a_0 + a_1x + a_2y, b_0 + b_1x + b_2y) \\ &\quad + n_2(x, y) \end{aligned} \quad (5.5)$$

其中， $n_1(x, y), n_2(x, y)$  分别为图像  $g_1, g_2$  的噪声。对上式应用泰勒公式做一阶展开，得到误差方程式：

$$\begin{aligned} v(x, y) &= c_1\Delta h_0 + c_2\Delta h_1 + c_3\Delta a_0 + c_4\Delta a_1 + c_5\Delta a_2 + \\ &\quad c_6\Delta b_0 + c_7\Delta b_1 + c_8\Delta b_2 - \Delta g(x, y) \end{aligned} \quad (5.6)$$

式中，误差方程式的系数为：



$$\begin{aligned}
 c_1 &= 1 \\
 c_2 &= g_2 \\
 c_3 &= \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial x_2}{a_0} = (\dot{g}_2)_x = \dot{g}_x \\
 c_4 &= \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial x_2}{a_1} = x\dot{g}_x \\
 c_5 &= \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial x_2}{a_2} = y\dot{g}_x \\
 c_6 &= \frac{\partial g_2}{\partial y_2} \cdot \frac{\partial y_2}{b_0} = \dot{g}_y \\
 c_7 &= \frac{\partial g_2}{\partial y_2} \cdot \frac{\partial y_2}{b_1} = x\dot{g}_y \\
 c_8 &= \frac{\partial g_2}{\partial y_2} \cdot \frac{\partial y_2}{b_2} = y\dot{g}_y
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

对于数字图像来讲，灰度均为规则网格排列的离散阵列，所以偏导数可用差分代替：

$$\begin{aligned}
 \dot{g}_x &= \frac{1}{2}[g_2(x_2 + 1, y_2) - g_2(x_2 - 1, y_2)] \\
 \dot{g}_y &= \frac{1}{2}[g_2(x_2, y_2 + 1) - g_2(x_2, y_2 - 1)]
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

若式中  $x_2, y_2$  应用式 5.4 变换后不是整数，可通过插值获得该点的灰度值。

$\Delta g(x, y)$  为相应像素灰度差，即：

$$\Delta g(x, y) = g_1(x, y) - g_2(a_0 + a_1x + a_2y, b_0 + b_1x + b_2y) \tag{5.9}$$

式 5.6 用矩阵形式表示为：

$$\begin{aligned}
 v(x, y) &= cx - \Delta g(x, y) \\
 \text{其中,} \\
 x &= [\Delta h_0 + \Delta h_1 + \Delta a_0 + \Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta b_0 + \Delta b_1 + \Delta b_2]^T \\
 c &= [1 \quad g_2 \quad \dot{g}_x \quad x\dot{g}_x \quad y\dot{g}_x \quad \dot{g}_y \quad x\dot{g}_y \quad y\dot{g}_y]
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

建立误差方程时，可采用以目标区域中心为坐标原点的局部坐标系。对匹配窗口中的每一个像素点按照式 5.10 建立一个误差方程式，这样可以得到一个关于修正向量  $x$  的误差方程组。应用最小二乘法对方程组求解，则修正向量为：

$$x = \left[ \sum_{x,y} c^T(x,y) \cdot c(x,y) \right]^{-1} \cdot \sum_{x,y} c^T(x,y) \cdot \Delta g(x,y) \quad (5.11)$$

根据最小二乘法的数学意义可知, 式 5.11 求解的目标函数均方误差最小, 即图像匹配的差平方和最小。

最小二乘图像匹配的迭代求解, 具体步骤为:

(1) 对图像进行几何校正、灰度校正, 校正公式由式 5.12 给出。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a_0^i & a_1^i & a_2^i \\ b_0^i & b_1^i & b_2^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Delta a_0^i & 1 + \Delta a_1^i & \Delta a_2^i \\ \Delta b_0^i & \Delta b_1^i & 1 + \Delta b_2^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a_0^{i-1} & a_1^{i-1} & a_2^{i-1} \\ b_0^{i-1} & b_1^{i-1} & b_2^{i-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 \\ g_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \Delta h_0^i & 1 + \Delta h_1^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h_0^{i-1} & \Delta h_1^{i-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ g_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.12)$$

在迭代的开始阶段认为两窗口之间没有几何变形、灰度变化, 初值按 5.13 取值。

$$\begin{aligned} h_0 &= 0 & h_1 &= 1 \\ a_0 &= 0 & a_1 &= 1 & a_2 &= 0 \\ b_0 &= 0 & b_1 &= 0 & b_2 &= 1 \end{aligned} \quad (5.13)$$

(2) 应用式 5.11 计算修正向量, 并计算经过几何、灰度校正后的两图像之间的相关系数, 判断是否继续迭代。当相关系数减小或修正向量小于给定的阈值时, 迭代终止。

(3) 计算最佳匹配点。根据最小二乘匹配的精度理论, 匹配精度取决于图像灰度的梯度  $\dot{g}_x, \dot{g}_y$ , 可用梯度的平方为权, 计算左窗口最佳匹配点为:

$$\begin{aligned} x_t &= \sum x \cdot \dot{g}_x^2 / \sum \dot{g}_x^2 \\ y_t &= \sum y \cdot \dot{g}_y^2 / \sum \dot{g}_y^2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

以该点为目标点, 它在匹配窗口的对于点可由式 5.4 求得。

最小二乘匹配法充分利用了图像窗口的信息, 使得匹配精度可以得到 0.1 甚至 0.01 像素精度, 该方法在航空射影测量中得到了成果的应用。但是该方法也存在一些缺点, 如计算速度慢, 迭代求解对初值要求较高。众多学者也对该方法做了一些改进, 如李峰等采用金字塔分解增加收敛范围<sup>[151]</sup>, 或根据图像连续

性,将相邻像素的校正向量作为当前点迭代的初值<sup>[152]</sup>;也有学者将遗传算法<sup>[153]</sup>、小波变换<sup>[154]</sup>等与最小二乘法相结合,提高图像匹配的性能。

### 5.3 匹配策略

在确定匹配基元和匹配准则之后,任何一对匹配点都提供了周围点的匹配情况的信息,这样,立体匹配的计算就变成了在某种匹配准则下的最优解问题,许多数学中的最优化技术可以应用于立体匹配。根据所使用的数学手段不同,匹配策略可分为动态规划法、松弛法、最小二乘法、小波法、模拟退火法、神经网络法、遗传算法等。

动态规划法<sup>[80]</sup>将匹配问题归结为一个基本的递推关系式使匹配过程连续地转移,图像的匹配问题转换为一个多阶段决策问题。一维动态规划沿极线方向考虑匹配的相容性,对目标图像上的匹配基元,逐一确定其匹配点,使得匹配在总体上最佳,尽管对一些个别点其匹配点的选择可能并不是最好。松弛法<sup>[81]</sup>是一种并行与迭代的算法,在每一次迭代过程中在每一个点的处理是并行的,它根据相似性准则给出外极线上各个点的匹配概率;再根据相容性准则给出以上概率定义的相容性度量,然后用非线性优化方法或迭代算法调整上述概率,使相容性准则最优。多分辨率方法<sup>[147]</sup>提供一种类似金字塔的影像分层数据,目的是减少计算时间、提高算法效率。在寻找匹配是由于高层的分辨率较小,因此可以很快搜索到匹配点;上层的匹配结果被作为下层匹配的初值,在较高分辨率图像的小邻域内搜索,大大的降低了匹配点的搜索范围。小波理论<sup>[82]</sup>是近年来兴起的一种崭新的时频域分析理论,可以准确定位信号的瞬变特征,而通过多分辨率变换,由可以对信号进行“切片式”分析,这一思想与由粗到细的多分辨率分析过程是一致的;另外,小波方法允许灵活的选择基函数,以满足不同的应用,这使我们有可能选择更加符合视觉机制的图像信息表达形式,从而建立更有效的立体视觉模型。遗传算法<sup>[84]</sup>是一种有效的快速寻优算法,最早由 Fitzpatrick 应用于图像配准领域,随后人们将遗传算法和图像匹配有机地结合起来,或改进遗传算法,其基本思想是:根据描述基元的特征向量定义用于遗传算法的适配函数,每一对对待确定的匹配基元都是一个染色体,而适配函数本身就可以认为是该遗传算法的适应度函数,然后按照遗传算法的步骤实现立体图像之间的匹配。

## 5.4 宽基线图像的匹配

在基于立体视觉原理的双目测量系统中,为了保证系统的测量范围和测量精度,两个摄像机之间的夹角较大、基线距离较大(见7.2节结构参数对精度的影响),同时由于被测对象表面几何形状的变化,实际获取的两幅图像之间存在较严重的几何变形、灰度变化,再加上噪声、遮挡等问题的影响,使得立体图像对之间的匹配变的异常困难。图5.3所示为投影黑白方格之后,左右摄像机采集的人脸鼻尖部分的立体图像对,由于宽基线以及曲面的剧烈变化,相同的投影方格在两幅图像上成像呈现很大的变形。

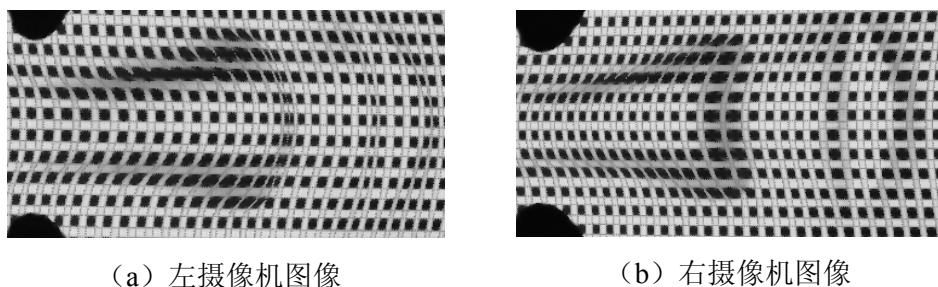


图5.3 宽基线时严重的几何变形

为解决宽基线立体匹配问题, Rimon Elias<sup>[155]</sup>假设拍摄对象的表面为一系列的平面组成,首先检测图像中的点特征,再根据两幅图像中的点特征计算单应矩阵,最后由单应矩阵对图像中的平面进行三维重建。Xiaoye Lu 和 Roberto Xiaoye Lu 和 Manduchi<sup>[156]</sup>在两幅图像的极线大致平行条件下,应用垂直于极线的直线对其它极线上的候选点进行顺序约束的方法,减小搜索空间的范围并降低错误匹配发生的可能性。Herber Bay 等<sup>[157]</sup>提出一种适用于少纹理区域的匹配方法,先对比较稳定可靠点边线进行匹配,并通过拓扑过滤去除错误匹配,然后采用迭代的方法逐步增加边线的匹配数量。Dmitry chetverikov<sup>[158]</sup>等对重复的纹理进行了分析,在宽基线匹配中利用重复纹理缩小匹配点的搜索范围,实现对特征点的精确搜索。Philip Pritchett 和 Andrew Zisserman<sup>[159]</sup>提出基于特征组合的匹配算法,该算法提取影像中的四边形区域,计算标准化相关系数确定局部单应矩阵,然后扩展到影像的其它部分。王宇宙和汪国平等<sup>[160]</sup>提出一种基于局部仿射不变量的宽基线影像匹配算法,该算法以影像特征点为定位点,使用分层尺度窗口内的几何和亮度仿射不变量特征实现立体匹配。

以上的各种方法解决了宽基线立体匹配中的一些问题,但它们基本是基于特

征匹配的图像匹配方法，只能获得稀疏的匹配点，而测量系统需要获得致密的测量数据；上述方法都对匹配对象存在一些先决的假设条件，而实际测量的外形是多种多样的。针对以上的问题和需求，本文提出一种适用于测量系统的宽基线立体匹配方法。该方法首先对编码结构光进行解码，完成被测对象的粗略测量；然后应用测量结果，估计每个小区域的单应矩阵，根据单应矩阵估计小区域在两幅图像上几何变形、灰度变化的初值；最后由给定的初值，采用最小二乘匹配进行精确的匹配。

### 5.4.1 图像的粗略匹配

本文采用双目立体视觉测量技术与编码光栅相接合的系统实现方案，编码光栅在系统中的作用相当于一个用硬件实现的金字塔分层图像匹配。一系列变化的光栅图案将被测物体的表面空间由粗到细地划分为不同的部分，从而实现图像由大区域到小区域的分层匹配，其实现过程与自顶向下的金字塔图像匹配方式类似，但编码光方法对匹配空间的搜索代价更小，因此编码结构光被认为是解决图像匹配的一种有效手段<sup>[21]</sup>。

目前已有多种结构光编码方法，Daniel Scharstein 和 Richard Szeliski<sup>[32]</sup>在相同的实验条件下，投影格雷编码光和正弦编码光对同一组对象进行测量，结果证明黑白颜色的格雷编码光具有更高的测量精度。Jordi Pages<sup>[38]</sup>等对各种应用于测量的编码光作了详细的分类和比较，指出在采用多幅图案、仅仅使用黑白颜色的情况下，编码光具有更高的精度、更高的分辨率并且更容易解码。参照以上文献，并根据测量系统的应用要求，本文的结构光采用格雷编码。

格雷码是一种无权码，采用绝对编码方式，它具有以下特点：

(1) 编码相互独立，这就是说每一个编码区间对应的编码是独一无二的，在编码空间中，不同的编码区域对应的格雷编码不同。根据这个特点，可以有效的解决图像匹配中的遮挡问题。如果一幅图像中的某个编码在另一幅图像中没有出现，则认为具有这个编码区域被遮挡。

(2) 自我规范的。对于每一个编码区域，至少会有一个暗条纹、一个亮条纹落在上面，对应像素点的灰度序列中就会存在一个较大和一个较小的灰度值。这种特性有助于图像二值化阈值的选择，文献<sup>[40]</sup>称之为自我规范性。在本文前面

介绍的图像二值化处理中，需要用到黑白条纹的灰度信息。

(3)相邻编码的 Hamming 距离为 1。相邻编码之间不同位的数量为 Hamming 距离。在二进制、十进制等编码形式中，相邻两个数字之间通常会有几个位不同。格雷编码中，如果对某个像素的译码出现错误，该像素点只会偏移 to 左边或右边相邻的编码区域。这一特点减小了译码错误对匹配精度的影响。

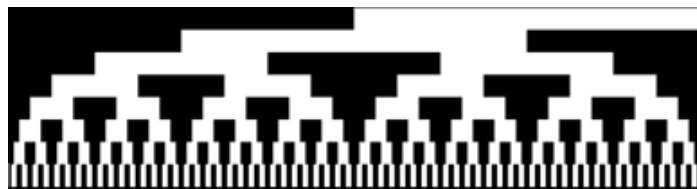
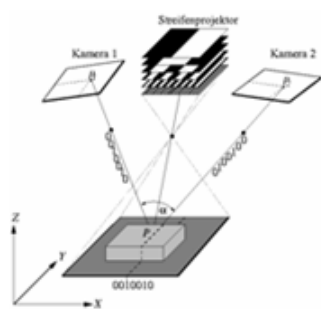
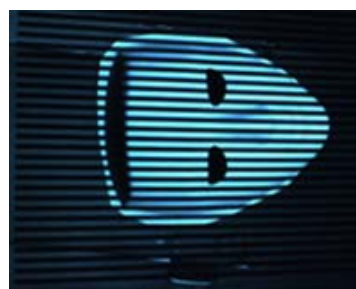


图5.4 八位格雷编码

图 5.4 所示为一种典型的八位格雷码。在测量过程中，图中的每一行对应为一幅二进制的投影图案，所有的投影结果给出 8 个关于被测物体的编码图像，或者从概念上说，所有的投影结果组成一幅图像，它的每一个像素点都用一个 8 位的向量来表示，这个 8 位的向量就是该像素点对应的格雷编码。



(a) 光栅投影



(b) 投影效果

图5.5 编码光投影

图 5.5 所示为编码光栅投影的示意图。其中 (a) 为光栅投影过程的示意，中上的黑白相间部分为一系列的编码光栅图像，其中的每一张图像对应图 5.4 中。雷编码的一行。(b) 为其中一幅光栅图像在被测物体表面产生的实际效果图。

如前所述，所有的投影结果组成一幅图像。关于该图像，有一些特别之处：图像的每一个像素点对应测量对象表面的一个微小区域，在单次测量过程中，像素点与微小区域的对应关系保持不变；像素点的灰度值的深度或位数与格雷编码的位数相同，像素点的灰度值就是该像素的对应微小区域的格雷编码。该图像的建立过程可以表述如下：

(1) 建立一幅分辨率与摄像机分辨率相同、位深度与格雷码的位数相同的灰度图像，记为  $I^+$ 。新建图像为全黑。

(2) 摄像机获取一系列与图 5.5 (b) 类似的投影图像，并应用 4.4.2 节的方法进行二值化。二值化之后，像素点的灰度值只能为 0 或 1，二值化之后的图像依次记为  $I_0, I_1, \dots, I_i$ 。

(3) 记录图像  $I_0, I_1, \dots, I_i$  的灰度值到图像  $I^+$ ，每一幅图像记录到  $I^+$  中像素点所对应向量的一个分量。这样  $I_0, I_1, \dots, I_i$  中的每一幅图像对应为  $I^+$  中的一位，或者说对应为图像  $I^+$  的一个位平面；如果对  $I^+$  进行图像分层<sup>[94]</sup>，所得到的每个位平面对应为  $I_0, I_1, \dots, I_i$  中的一幅图像，它们的关系如图 5.6 所示。

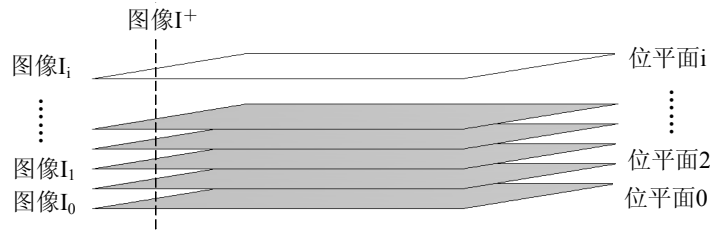


图5.6 图像叠加

在上述处理过程中，叠加左摄像机的图像系列，得到的图像记为  $I_L^+$ ，右摄像机叠加得到的图像记为  $I_R^+$ 。在  $I_L^+$  与  $I_R^+$  中，相等的灰度值对应为相同的灰度编码，因此两幅图像中灰度值相同的区域即为对应的匹配区域。在匹配过程中，可以取区域的几何中心作为对应的匹配点，几何中心  $(x, y)$  的计算由下式计算：

$$\begin{aligned} x &= \sum x_i / n \\ y &= \sum y_i / n \end{aligned} \quad (5.15)$$

在这个过程中，我们没有考虑到图像二值化造成的误差，以及噪声等对译码等造成的影响，因此这一步匹配只能称为图像的粗略匹配。

对于分辨率为  $m \times n$ 、位深度为  $d$  的图像， $I_L^+$  的每个像素点，都需要在  $I_R^+$  中逐一查找匹配点，因此匹配过程的时间复杂度为  $O(m^2 \times n^2)$ 。为提高图像匹配的效率，对图像  $I_L^+, I_R^+$  分别建立一个深度  $d$  的二叉树，根据每个像素点对应的向量，依次添加到二叉树的叶子节点。图 5.7 所示为深度  $d = 4$  的情况下，像素点 A、B 添加到二叉树的过程。建立二叉树之后，每个像素点的匹配只需沿二叉树的深度方向进行查找，因此图像匹配的时间复杂度减小为  $O(m \times n \times d)$ 。对一百万像素分辨率、8 位深度的图像进行匹配，在建立二叉树存储结构之后的时间复杂度减小为原来的十万分之一。二叉树的建立、查找、删除操作可参考文献<sup>[161]</sup>。

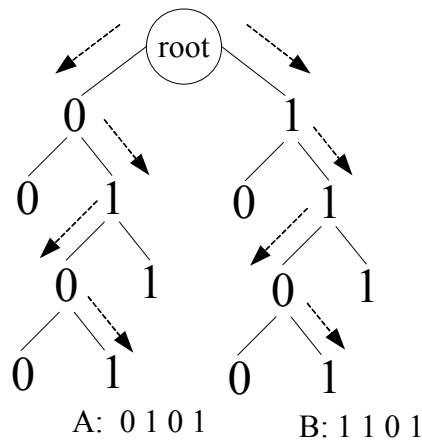
图5.7 由 $I^+$ 建立二叉树

图 5.8 为根据粗匹配结果重建的人脸模型，其中图（a）为完整的模型，（b）为方框部分的局部放大图，可以看出重建的三维曲面只具有有限的精度。

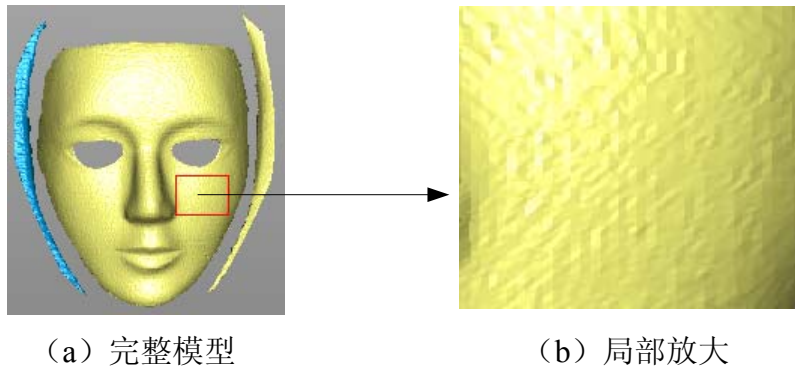


图5.8 粗匹配结果三维重建

### 5.4.2 初值的估计

为了实现图像的精确匹配，我们选用了被人称为“高精度影像匹配”的最小二乘图像匹配。如前所述，最小二乘图像匹配是非线性系统，必须进行迭代，迭代过程的收敛性、收敛速度等取决于初值，因此采用最小二乘图像匹配时需要给定较好的初值。

在航空摄影测量中，因为摄像机距离被测对象很远，同时两摄像机的相对距离较近，因此立体图像对之间的几何变形、灰度变化较小，即使按式 5.13 取定初值也能获得高精度的匹配结果。在宽基线的立体图像匹配中，如按式 5.13 取定初值，很可能会出现迭代速度慢或迭代过程不收敛。以 5.4.1 节的粗匹配点为窗口的中心，按式 5.13 取初值，对图 5.8 的匹配结果进行最小二乘图像匹配，结果如图 5.9 所示，其中图（a）完整的模型，出于显示方面的考虑，在这里删除



了大量的噪声点；(b) 为局部区域的旋转放大图。最小二乘匹配在迭代收敛的区域获得了极高的精度，但在大部分区域迭代计算不收敛，因此在宽基线的图像匹配中，必须对迭代计算的初值进行估计。

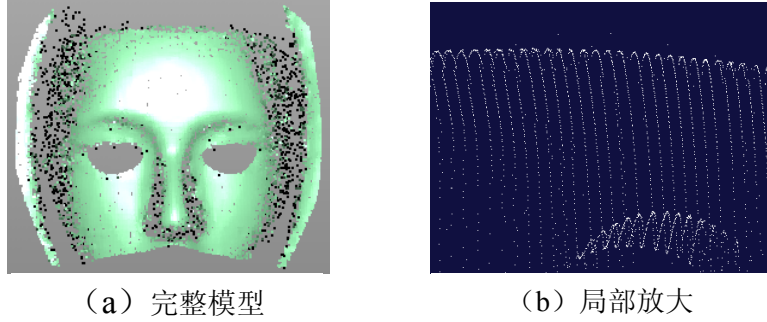


图5.9 未给定初值的最小二乘匹配结果

#### 5.4.2.1 立体图像间的单应矩阵

根据图像粗匹配的结果，可以得到关于被测对象表面的点云数据，点云数据给定了各点的空间坐标；通过对点云数据的后处理，可以得到各点及其邻域的法线。如果将每一个小的邻域近似为一个平面，则平面的方程可以表示为：

$$n_x x + n_y y + n_z z + d = 0$$

用矩阵形式表示为：

$$(n^T, d)X = 0 \quad (5.16)$$

其中， $n$  为平面的法线， $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ ， $X$  为点的齐次坐标， $X = (x, y, z)^T$ 。

根据平面摄影变换的基本原理，空间平面与图像平面之间的射影关系可以表示为一个 6 自由度的透视变换，而两个摄像机图像平面之间的关系，可以表示成一个 8 自由度的射影变换。假定标定的双摄像机矩阵分别为（取第一个摄像机坐标系为世界坐标系）：

$$P_E = K[I \quad 0] \quad P'_E = K'[R \quad t] \quad (5.17)$$

式 5.16 表示的平面，在式 5.17 确定的两摄像机同时成像，像点之间的几何关系可以用一个  $3 \times 3$  矩阵表示为<sup>[137]</sup>：

$$\begin{aligned} u' &= H \cdot u \\ H &= K'(R - tn^t/d)K^{-1} \end{aligned} \quad (5.18)$$

其中,  $u, u'$  分别为像点在第一、第二个图像坐标系中的像素坐标。矩阵  $H$  被称为单应矩阵。

#### 5.4.2.2 几何变形的估计

根据式 5.20 可以确定左摄像机图像中各编码区域的几何中心  $(x, y)$ , 以点  $(x, y)$  为中心, 建立一个  $m \times m$  大小的矩形, 矩形的顶点为  $(u_i, v_i, 1), i = 0, \dots, 3$ , 由式 5.23 可以确定它们在右图像中对应的顶点为  $(u'_i, v'_i, 1)$ 。

将  $(u_i, v_i, 1), (u'_i, v'_i, 1)$  带入式 5.4 表示的几何变形方程式, 建立以几何变形  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  为未知数的方程组:

$$\begin{bmatrix} 1 & u_i & v_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 & b_0 \\ a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u'_i & v'_i \end{bmatrix}, \text{ 其中 } i = 0, \dots, 3 \quad (5.19)$$

对上式求解, 左摄像机上点  $(x, y)$  及其邻域在右摄像机上的几何变形。

#### 5.4.2.3 灰度变化的估计

假设经过对几何变形的校正之后, 左右图像窗口的灰度分布分别为  $g_1, g_2$ , 考虑灰度的线性变化, 则:

$$g_1 + n_1 = h_0 + h_1 g_2 + g_2 + n_2(x, y) \quad (5.20)$$

其中,  $n_1, n_2$  为图像  $g_1, g_2$  的噪声,  $h_1, h_2$  为图像的灰度变化。由上式可以得到只考虑灰度线性变化的最小二乘匹配的数学模型:

$$v = h_0 + h_1 g_2 - (g_1 - g_2) \quad (5.21)$$

对匹配窗口中的各像素点建立如式 5.20 所示的灰度变化方程, 并采用最小二乘法求解, 得:

$$\begin{aligned} h_0 &= (\sum g_1 - \sum g_2 - h_1 \sum g_2) / n \\ h_1 &= \frac{\sum g_1 \sum g_2 - n \sum (g_1 g_2)}{(\sum g_2)^2 - n \sum g_2^2} - 1 \end{aligned} \quad (5.22)$$

如果对每个像素作中心化处理，则  $\sum g_1 = 0, \sum g_2 = 0$ ，由此得到：

$$\begin{aligned} h_0 &= 0 \\ h_1 &= \sum (g_1 g_2) / \sum g_2^2 - 1 \end{aligned} \quad (5.23)$$

### 5.4.3 图像的精确匹配

在所有的前提条件与图 5.9 相同的情况下，应用上述方法对匹配的初值进行估计，然后用估计的初值对图像进行最小二乘图像匹配，图 5.10 为根据匹配结果重建的人脸模型，其中图 (a) 为完整的模型，(b) 为红色方框部分的局部放大图。与图 5.8、图 5.9 对比可知，图像匹配的精度、最小二乘匹配的收敛性等都得到了极大的改进。

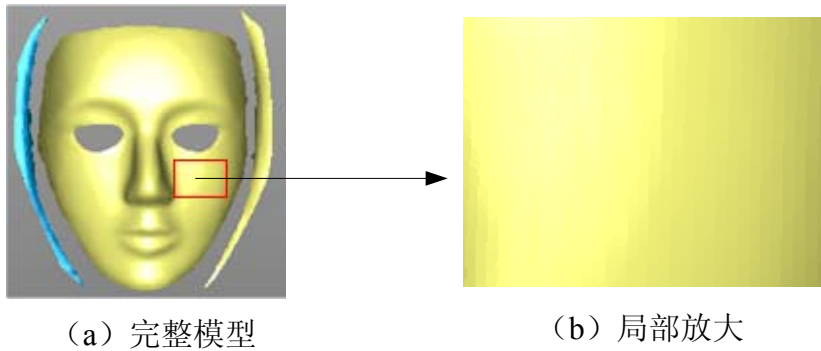


图5.10 精确匹配结果三维重建

## 5.5 本章小结

图像匹配是立体视觉测量中的重点和难点，本章首先介绍了一些基本的图像匹配方法，并分析了这些方法的优缺点，然后针对编码结构光的特点提出了一种宽基线图像匹配方法。该方法首先通过对编码结构光的解码，实现图像的粗略匹配，然后应用粗匹配结果估计各匹配点之间的几何变形和灰度变化，最后以估计值为初值通过迭代计算实现图像的精确匹配。在实际应用中，该方法获得了较高的匹配精度，并且迭代收敛速度较快。



## 第6章 全局坐标下的三维重建

图像匹配建立了立体图像对之间的对应关系之后,可以通过两摄像机之间的几何约束进行空间点的三维重建。空间点的三维重建可以按不同的误差评判准则进行,同时从不同方位获得的测量数据,需要采用合适的方法转换到统一的世界坐标系下。本章推导了在各种误差评判准则下的三维重建公式,提出了一种基于标志点的测量数据自动拼接方法,另外,对空间点云的处理做了简要的介绍。

### 6.1 空间点的三维重建

已知摄像机的内外参数和两个对应点  $p_1, p_2$ , 理论上, 经过光学中心和对应点的直线  $R_1, R_2$  将相交于空间的物点。然而, 实际中由于标定、匹配和数字计算的误差, 直线  $R_1, R_2$  可能永远不会真正相交, 如图 6.1 所示。在这种情况下, 有很多方法可实现空间点的三维重建, 各种不同的方法表现为不同的误差评判准则。

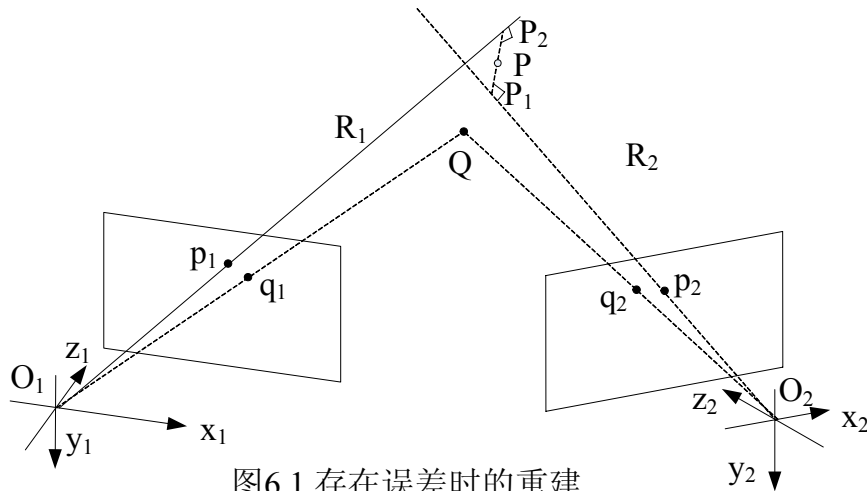


图6.1 存在误差时的重建

#### 6.1.1 根据标定方程重建

在摄像机标定过程中已经知道, 摄像机的内外参数与像点之间的关系可以表示为式 3.9 的形式。在双目立体视觉测量中我们可以得到两个形如式 3.9 的代数方程:

$$\begin{aligned}
(u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z &= m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\
(v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z &= m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\
(u_2 m_{31}^2 - m_{11}^1)X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z &= m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\
(v_2 m_{31}^2 - m_{21}^1)X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z &= m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2
\end{aligned} \tag{6.1}$$

其中,  $(u_1, v_1, 1), (u_2, v_2, 1)$  分别为像点在第一、第二个图像坐标系中的其次坐标;  $(X, Y, Z, 1)$  为物点在世界坐标系中的齐次坐标;  $m_{ij}^k$  为第  $k$  个摄像机的投影矩阵的第  $i$  行  $j$  列元素。

由解析几何知, 三维空间的平面方程为线性方程, 两个平面方程的联立表示两平面相交得到的空间直线, 式 6.1 在几何上表示经过像点和摄像机光学中心的直线  $R_1, R_2$ 。式 6.1 为包含三个未知数四个方程的线性方程组, 理论上只包含三个独立方程, 在实际应用中由于误差的存在, 我们可用最小二乘法求解。根据最小二乘法代数意义, 方程 6.1 求解的结果使得等式左右两边的均方误差最小化。因此, 这种重建方法没有明显的几何解释。

### 6.1.2 直线距离最短

由于各种误差的存在, 直线  $R_1, R_2$  并不能真正相交, 其几何关系为异面的空间直线。可以建立一条线段同时垂直  $R_1, R_2$ , 并分别交两直线于点  $P_1, P_2$ , 这条线段的中点  $P$  是最靠近直线  $R_1, R_2$  点, 可以把它作为像点  $p_1, p_2$  对应的物点, 如图 6.1 所示。点  $P_1, P_2, O_1, O_2$  之间的关系可以表示为式 3.16 的形式。

以第一个摄像机坐标系为世界坐标系, 第二个摄像机相对一个摄像机的旋转矩阵为  $R$ , 平移向量为  $T = (t_x \ t_t \ t_z)^T$ , 空间点  $P_1, P_2$  在两摄像机坐标系中的  $Z$  坐标分别为  $z_1, z_2$ , 像点  $p_1 = (u_1 \ v_1 \ 1)^T$ ,  $p_2 = (u_2 \ v_2 \ 1)^T$ , 两摄像机的焦距分别为  $f_1, f_2$ , 则向量  $\overrightarrow{O_1 P_1}, \overrightarrow{O_1 O_2}, \overrightarrow{O_2 P_2}$  可表示为:

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{O_1 P_1} &= z_1 (u_1 / f_1 \ v_1 / f_1 \ 1)^T = z_1 \cdot p_1 \\
\overrightarrow{O_1 O_2} &= (t_x \ t_t \ t_z)^T = T \\
\overrightarrow{O_2 P_2} &= z_2 R (u_2 / f_2 \ v_2 / f_2 \ 1)^T = z_2 R \cdot p_2
\end{aligned} \tag{6.2}$$

将以上变量带入式 3.16, 得:

$$z_1 p_1 = T + z_2 R p_2 + \lambda z_1 z_2 [p_1 \times (R p_2)] \quad (6.3)$$

这样，得到含有变量  $z_1, z_2, \lambda$  的三个方程，令  $\lambda z_1 z_2 = \lambda_z$ ，矩阵  $p_1 \times (R p_2) = m$  记为。式 6.3 分离变量并用矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} p_1 & -R p_2 & -m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \lambda_z \end{bmatrix} = T \quad (6.4)$$

式 6.4 可以分解为含有三个未知数的三个线性方程，求解可得变量  $z_1, z_2, \lambda_z$ ，进一步可求得变量  $\lambda$ 。

变量  $z_1, z_2, \lambda$  带入式 6.2 可求得向量  $\overrightarrow{O_1 P_1}, \overrightarrow{O_1 O_2}, \overrightarrow{O_2 p_2}$ ，点  $P$  可表示为：

$$P = (\overrightarrow{O_1 P_1} + \overrightarrow{O_1 O_2} + \overrightarrow{O_2 p_2}) / 2 \quad (6.5)$$

采用这种方法求得的物点  $P$  具有明显的几何意义，它是为空间异面直线  $R_1, R_2$  的公垂线段的中点。

### 6.1.3 重投影误差最小

在 6.1 所示的情况中，设像点  $p_1, p_2$  对应的物点为  $Q$ ， $Q$  点在图像平面的实际像点为  $q_1, q_2$ ，点  $Q$  的选择条件要求使  $d^2(p_1, q_1) + d^2(p_2, q_2)$  最小。

式 6.1 进行坐标分离，得到关于像点  $q_1, q_2$  坐标的显式表达：

$$\begin{aligned} u_1^q &= \frac{m_{11}^1 X + m_{12}^1 Y + m_{13}^1 Z + m_{14}^1}{m_{31}^1 X + m_{32}^1 Y + m_{33}^1 Z + m_{34}^1} = f_1^q(X, Y, Z) \\ v_1^q &= \frac{m_{21}^1 X + m_{22}^1 Y + m_{23}^1 Z + m_{24}^1}{m_{31}^1 X + m_{32}^1 Y + m_{33}^1 Z + m_{34}^1} = f_2^q(X, Y, Z) \\ u_2^q &= \frac{m_{11}^2 X + m_{12}^2 Y + m_{13}^2 Z + m_{14}^2}{m_{31}^2 X + m_{32}^2 Y + m_{33}^2 Z + m_{34}^2} = f_3^q(X, Y, Z) \\ v_2^q &= \frac{m_{21}^2 X + m_{22}^2 Y + m_{23}^2 Z + m_{24}^2}{m_{31}^2 X + m_{32}^2 Y + m_{33}^2 Z + m_{34}^2} = f_4^q(X, Y, Z) \end{aligned} \quad (6.6)$$

关于  $(p_1, q_1), (p_2, q_2)$  误差方程可以表示为：

$$\begin{aligned}
u_1^q - u_1 &= f_1^q(X, Y, Z) - u_1 = f_1(X, Y, Z) \approx 0 \\
v_1^q - v_1 &= f_2^q(X, Y, Z) - v_1 = f_2(X, Y, Z) \approx 0 \\
u_2^q - u_2 &= f_3^q(X, Y, Z) - u_2 = f_3(X, Y, Z) \approx 0 \\
v_2^q - v_2 &= f_4^q(X, Y, Z) - v_2 = f_4(X, Y, Z) \approx 0
\end{aligned} \tag{6.7}$$

以上简记为： $f(x) = 0$

上式是关于物点坐标  $(X, Y, Z)$  的非线性过约束方程组，点  $Q$  的选择要求等价于方程组的均方误差  $E(x)$  局部最小。与前两种方法不同的是，这个方法没有重建的解析解，只能采用牛顿法、高斯牛顿法或 Levenberg—Marquardt 迭代求解，解的代数意义即为  $E(x)$  局部最小。可以采用前两种方法获得的结果作为这个优化过程的初值。

## 6.2 测量数据的拼接

在三维物体外形检测的过程中，由于设备测量范围的限制或者被测物体表面互相遮挡，一次只能获得物体的局部数据。这就需要从不同的方位对物体进行多次测量，然后对测得的数据进行拼接，生成一个统一坐标系下的三维数据点集。测量数据的拼接是一种刚性的运动，因此可以通过求得不同测量方位的相对位姿来实现。相对位姿的计算可以通过计算机视觉中的运动分析<sup>[162]</sup>来实现，也可以采用人工智能中的 3D 目标识别<sup>[163]</sup>的方法，目前在测量领域主要有三种方法来解决这个问题：

(1) 通过 ICP 算法 (Iterative Closest point registration) 进行拼接。该算法的基本思想是：对给定的两个点集，指定若干点 (区域) 之间的对应关系，然后通过最小二乘算法计算一个最优的坐标变换矩阵，并进行迭代计算直到满足精度为止。迭代过程的主要约束<sup>[88]</sup>包括：点云之间的距离、对应点处的切平面的距离、三角化网格之间的距离、特征曲线之间的距离以及曲率、绕率、法矢的相似性等。这类算法在每次迭代过程中都需要对点集中的每个点或指定点 (区域) 进行计算，因此计算复杂、效率底，精度也不高。这类算法的优点是不需要任何辅助设备，也不需要对测量表面做任何的标记，因此拼接过程非常灵活。

(2) 采用辅助设备，精确控制测量设备的运动<sup>[18]</sup>或物体的运动<sup>[19]</sup>，由控制系统提供准确的旋转矩阵  $R$  和平移  $T$ 。该方法的拼接精度依赖于运动平台的运动



精度以及运动平台位姿的标定精度，目前的技术基本能够保证这两方面的精度要求。在所有拼接方法中，这类方法的精度最高，并且拼接过程的自动化程度高，几乎不需要任何人工干预。它的主要缺点是测量设备或物体的运动受平台运动自由度的限制，测量过程不灵活；如果测量过程中物体需要多次摆放，还需要借助其它方法才能完成数据拼接。

(3) 在两次测量的公共区域布置若干标志点，通过标志点检测和对齐来计算变换矩阵。这种方法操作简单，并具有一定的拼接精度，在实际应用中被众多的测量系统采用。它的主要缺点是标志点的布置会导致点云数据出现一些小的空白区域。

由于 ICP 算法的精度有限，本文主要对后两种拼接方法展开了详细的研究。

### 6.2.1 基于精密机构的拼接

这类方法采用高精度的运动平台控制测量设备或被测物体的运动，对运动平台的基本要求是运动平稳、可精确定位、运动自由度多。在传统的测量系统中多选用高精度车床、三坐标测量机等作为运动平台，通过与现有设备的集成实现多方位测量以及测量数据的自动拼接，但受平台运动自由度的限制，仍然会存在一些测量盲区。针对这类问题，本课题组采用多关节机械臂作为运动平台，利用多关节机械臂结构轻便、运动灵活的特殊优点，对物体进行全方位的测量。

#### 6.2.1.1 多关节机械臂

图 6.2 (a) 给出了一种多关节机械臂的机械结构，该机械臂由 6 个旋转关节和杆件组成。每个关节中安装有角度编码器，关节的转角可以被实时测量，关节之间由长度不同的杆件连接，形成一个空间开环的连杆机构。根据杆件的长度、相对位姿和关节的转角，可以对末端的位姿精确定位。对这类相邻关节名义上垂直的空间开环机构，一般采用 Denavit—Hartenberg 方法<sup>[164]</sup>进行分析，在机器人学中对此已有系统而成熟的研究。

图 6.2 (b) 为机械臂中任意两相邻关节之间的位置关系，按 D-H 方法，坐标系  $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  与  $o_ix_iz_i$  之间的变换可以按以下步骤实现：首先

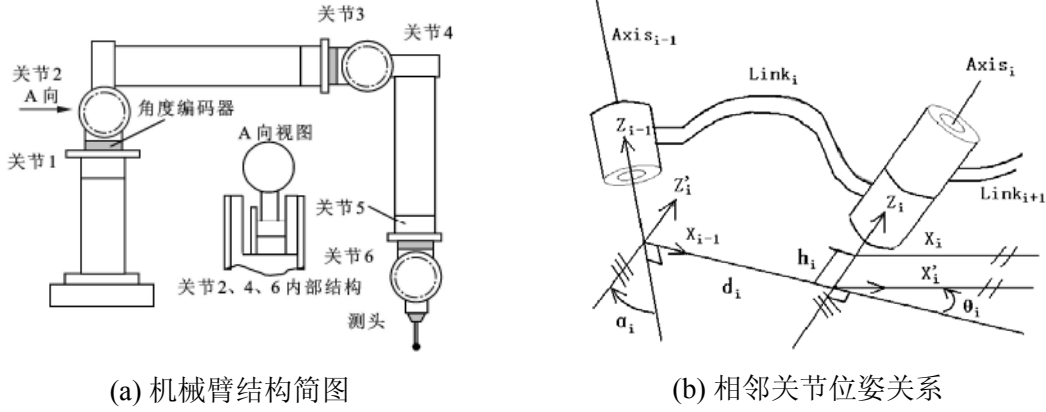


图6.2 多关节机械臂

$o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  绕  $z_{i-1}$  轴旋转  $\theta_i$ ,  $\theta_i$  为关节转角, 由角度编码器读取; 然后沿  $z_{i-1}$  移动  $h_i$ , 使得  $x_{i-1}$  与  $x_i$  重合,  $h_i$  为相邻杆件坐标原点沿轴方向的距离, 称为杆长; 再沿  $x_i$  移动  $d_i$ ,  $d_i$  为相邻关节轴线在空间的垂直距离; 最后坐标系绕  $x_i$  旋转  $\alpha_i$ , 为相邻关节旋转轴的夹角, 近似直角。因此两坐标系的变换矩阵为:

$$T_{i-1,i} = Rot(z_i, \theta_i) Trans(0, 0, h_i) Trans(d_i, 0, 0) Rot(x_i, \alpha_i) \quad (6.8)$$

在机械臂的基座上建立世界坐标系, 则机械臂末端点的坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^7 T_{i-1,i} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_{0,7} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

如果机械臂的末端是接触式测头, 当触点接触到被测物体时, 根据各角度传感器的读数以及机械臂的结构参数, 由式 6.9 可以确定接触点在世界坐标系的坐标。如果机械臂的末端安装有非接触式测头, 根据当前机械臂末端的位置和机械臂与测头的相对位姿, 可以将测头获得的测量数据转换到世界坐标系, 实现测量数据的自动拼接。

### 6.2.1.2 手眼标定

将本文前面介绍的双目立体视觉测量系统(以下简称测头)安装在机械臂的末端件上, 这种配置相当于将“眼”安装在“手”上。为实现测量数据的自动拼

接，需要确定末端件与测头坐标系之间的相互关系，确定这种转换关系在机器人领域称为机器人手眼标定<sup>[165]</sup>。

测头固定在机械臂的末端件上，测头与末端件之间的位姿关系也因而固定。*Zhuang*<sup>[166]</sup>将机器人手眼转换关系与机器人末端件作为一个整体进行建模，用于机器人运动学参数校准，但由于机器人校准误差引入到手眼关系矩阵，参数耦合在一起无法区分。*Shui*<sup>[167]</sup>提出了解决手眼标定问题的数学解，并把这类问题归纳为机器人—摄像机校准统一方程，但这类方法在测头处在不同位姿时，都需要用标定块对测头的外参数进行标定。对于已标定的机械臂和双目立体视觉测头，本文直接应用最小二乘法求解手眼关系。

对于基座固定并安装有非接触系统（以下简称测头）的机械臂平台，以机械臂平台的坐标系为世界坐标系，对空间任一点  $P_i$ ，由机械臂可测得其坐标为  $P_{w1} = (x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})^T$ 。牵引机械臂末端件到某一位置，使得  $P_i$  点对于测头可见，此时机械臂末端件的空间位姿用矩阵  $C_1$  表示，可由式 6.9 中的变换矩阵求得。稳

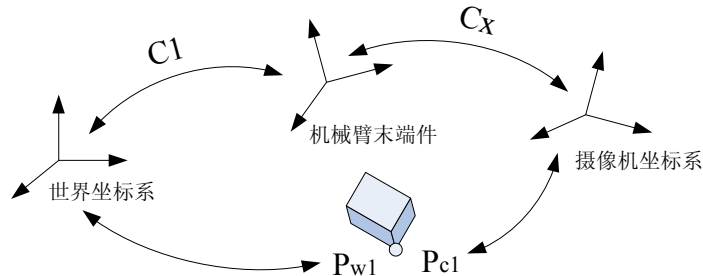


图6.3 各坐标系的位姿关系

定机械臂平台在该位姿，由测头测得  $P_i$  点在测头坐标系中坐标为  $P_{c1} = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})^T$ 。设测头与机械臂末端件的位姿矩阵为  $C_x$ ，则  $P_{w1}$  与  $P_{c1}$  的坐标关系可表示为：

$$C_1 \cdot C_x \cdot P_{c1} = P_{w1} \quad (6.10)$$

$C_1$  是由旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$  组成的可逆矩阵，上式两边乘以  $C_1^{-1}$  得：

$$C_x \cdot P_{c1} = C_1^{-1} P_{w1} \quad (6.11)$$

记上式的右边为  $P'_{w1}$ ， $P'_{w1} = (x'_{w1}, y'_{w1}, z'_{w1}, 1)$ 。矩阵  $C_x$  中，旋转矩阵  $R$  的第  $i$  行第  $j$  列元素为  $r_{i,j}$ ，平行向量  $T$  为  $(t_x, t_y, t_z)$ ，式 6.11 可改写为：

$$B \cdot w = P'_{w1} \quad (6.12)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} x_{c1} & y_{c1} & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{c1} & y_{c1} & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{c1} & y_{c1} & z_1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$w = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{21} \ r_{22} \ r_{23} \ r_{31} \ r_{32} \ r_{33} \ t_x \ t_y \ t_z]^T$$

给定 4 对以上空间点，建立关于  $w$  的线性方程组，由最小二乘法可解的变换矩阵  $C_x$ 。理论只需要 3 对一般位置的对应点就能完全全都两个坐标系之间的位姿关系，但方程 6.13 中由于没有考虑选择旋转矩阵正交和单位阵的性质而引入了更多的求解参数。由于不需要对矩阵  $C_x$  进行参数分解，因此这种方法在实际应用中是可行的。式 6.12 求解结果的几何意义是：经过矩阵  $C_x$  变换后，非接触式测头的测量结果相对机械臂平台末端件坐标系的均方差最小。

综上所述，以机械臂为运动平台的数据拼接方法可用如下的流程框图表示：

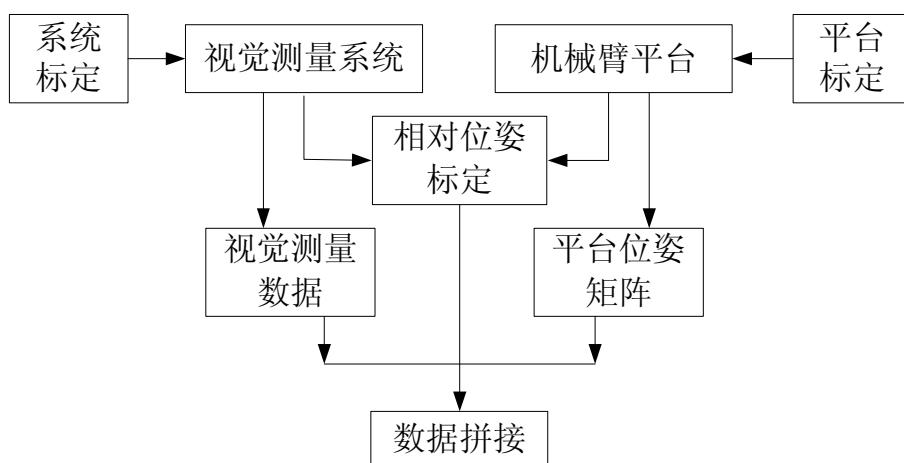


图6.4 以机械臂为平台的数据拼接流程

### 6.2.2 基于标志点的拼接

在被测物体表面粘贴一系列特殊的图形标记或球形标记，采用各种非接触式、接触式测量方法，可以很方便地获得标志点的空间坐标。标志点的位置应随机的分布在两次测量时公共区域的最外围，并具有尽可能大的多边形面积；同时标志点的位置应选择容易测量和不会发生变形的地方；标志点的设计和获取，4.3

节已详细的讨论。

本文提出一种基于标志点的测量数据自动拼接方法。该方法根据标志点的空间拓扑关系，利用关系匹配自动找出对应标志点对，并应用 Rodrigues 参数表示位姿变换矩阵，简化参数求解过程。

### 6.2.2.1 标志点集的描述

任何一个标志点集均由以下三部分所组成<sup>[72]</sup>：

(1) 一组基本特征元素。例如点、线和面，在关系匹配中，它们组成一个集合，其中的面主要是三角平面。例如图 6.5 所示的点集 A，其特征集合由 4 个点，6 条边和 4 个面组成：

$$A1 = (v1, \dots, v4; e1, \dots, e4; a1, \dots, a4) \quad (6.14)$$

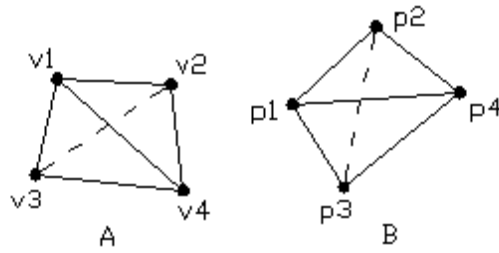


图6.5 标志点集

(2) 特征元素的空间关系。例如，边元素由点对定义，仍以图 6.5 为例，边元素由以下关系定义：

$$Re = \{ \langle v1, v2 \rangle, \langle v1, v3 \rangle, \langle v1, v4 \rangle, \langle v2, v3 \rangle, \langle v2, v4 \rangle, \langle v3, v4 \rangle \} \quad (6.15)$$

面元素由关系 Ra 定义：

$$Ra = \{ \langle e1, e2, e3 \rangle, \langle e1, e2, e4 \rangle, \langle e1, e3, e4 \rangle, \langle e2, e3, e4 \rangle \} \quad (6.16)$$

(3) 特征元素的性质，主要指几何性质，例如点的坐标、边的长度、面的面积等。

本文采用图 6.6 所示的层次结构记录一个标志点集，其中最上层为连接任意三个标志点所形成的三角面，中间层为三角面的三条边，最下层为各条边的顶点。该结构基本包括了标志点集描述的三个部分。

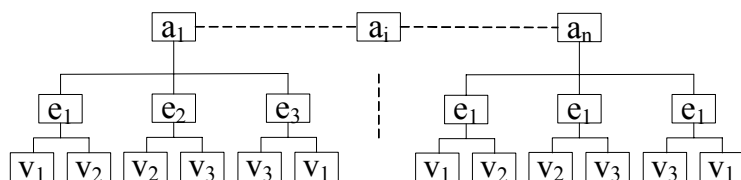


图6.6 标志点基的层次结构描述

### 6.2.2.2 对应点的查找

为了获得标志点的对应关系，需要设计一个变换  $h$ ，将点集  $A$  上的点映射到点集  $B$ ，然后比较特征元素性质的相似程度，具有最大相似程度的变换就是所求的标志点对应。例如图 6.5 中的点集  $A$  与  $B$ ，假设变换  $h1$ ：

$$\begin{aligned} h1: v1 &\rightarrow p1 \\ v2 &\rightarrow p2 \\ p3 &\rightarrow p3 \\ v4 &\rightarrow p4 \end{aligned}$$

则，点集  $A$ 、 $B$  具有最大的相识程度。

对应点的查找就是在—组变换  $H = \{h1, h2, \dots, hn\}$  中，寻找最佳的变换，使得两个点集具有最大的相似程度，这个过程称为关系匹配。在两个标志点集中，可能的匹配是大量的，并且不是每一个点都能够在另一个点集中找到对应点，因此最佳匹配的寻找时间可能会很长。为了加速计算，导出一种分级的最佳匹配寻找方法：

(1) 比较三角面元素的面积，根据 (1) 式判断两个面的面积是否兼容，其中  $V1$ 、 $V2$  为三角形的面积， $t$  为预先设定的面积阈值；找出所有面积兼容的面。

$$-t < \frac{V1 - V2}{\min(V1, V2)} < t \quad (6.17)$$

(2) 对有面积兼容的三角面，根据 (1) 式找出长度兼容的边的数量  $En$ ，其中  $V1$ 、 $V2$  为三角形的边长， $t$  为预先设定的边长阈值；如果  $En=3$ ，则认为两个三角面兼容；

3) 对兼容的三角面，记录三个点对之间的对应关系；如果没有兼容的三角面，这两个标志点集不能进行拼接；

面积阈值和边长阈值是寻找最佳匹配的关键参数，它们与测量系统的测量范

围、测量误差以及误差的统计学分布规律有着密切的联系，在实际应用中需要根据设备的具体情况进行设定。

通过以上的步骤，程序可以快速可靠地找到两个标志点集的对应点。对于一个精度可靠的测量系统，当兼容三角面的数量大于 1 的时候，一个标志点对将会在数个兼容的三角面中被找到；但一个标志点最多只能找到一个对应点。

### 6.2.2.3 变换矩阵的求解

设点  $P$  在坐标系  $C_1, C_2$  中的坐标分别为  $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$ ， $C_1$ 、 $C_2$  之间的相对旋转矩阵为  $R$ ，相对平移向量为  $(T_x, T_y, T_z)$ ，则：

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_2 + T_x \\ Y_2 + T_y \\ Z_2 + T_z \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

旋转正交矩阵  $R$  可利用反对称矩阵

$$U = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

表示为：

$$R = (I - U)^{-1} \cdot (I + U) \quad (6.20)$$

向量  $(u_x, u_y, u_z)$  为坐标系  $C_2$  相对于坐标系  $C_1$  的 Rodrigues 参数<sup>[168]</sup>，其几何意义表示刚体绕定点转动的旋转轴方向。

将式 6.19，6.20 带入式 6.18，并按已知量和未知量进行整理，得：

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 0 & Z1 + Z2 & -(Y1 + Y2) \\ -(Z1 + Z2) & 0 & X1 + X2 \\ Y1 + Y2 & X1 + X2 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} ux \\ uy \\ uz \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 1 & -uz & uy \\ uz & 1 & -ux \\ -uy & ux & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X2 \\ Y2 \\ Z2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.21)$$

引入辅助参数

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -uz & uy \\ uz & 1 & -ux \\ -uy & ux & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

整理上式，得：

$$\begin{bmatrix} 0 & (Z1+Z2) & -(Y1+Y2) & 1 & 0 & 0 \\ -(Z1+Z2) & 0 & X1+X2 & 0 & 1 & 0 \\ Y1+Y2 & -(X1+X2) & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} ux \\ uy \\ uz \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X1-X2 \\ Y1-Y2 \\ Z1-Z2 \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

简记为： $M \cdot X = \Delta$

对于  $n$  ( $n \geq 3$ ) 个标志点对，可以得到如下的方程组：

$$\begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ \vdots \\ Mn \end{bmatrix} \cdot X = \begin{bmatrix} \Delta1 \\ \Delta2 \\ \vdots \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

式 6.24 是一个系数矩阵列满秩的线性方程组，用最小二乘法求解，得到 Rodrigues 参数以及引入的辅助参数。根据式 6.20 可求得旋转矩阵  $R$ ，根据式 6.22 可求得平移向量  $(T_x, T_y, T_z)$ ，即：

$$\begin{bmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + ux^2 + uy^2 + uz^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 + ux^2 & ux \cdot uy + uz & ux \cdot uz - uy \\ ux \cdot uy - uz & 1 + uy^2 & uy \cdot uz + ux \\ ux \cdot uz + uy & uy \cdot uz - ux & 1 + uz^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

图 6.7 中 (a)、(b) 为相邻的两片测量数据，数据之间有一定的重叠部分，其中的十字形是测量系统检测出的标志点。根据本文所述的方法，程序首先在两



个标志点集中找出对应标志点对，(a)、(b)中颜色相同的十字形为一个标志点对。以标志点对为基础，解得刚性变换的旋转矩阵和平移向量，图(c)为拼接后的点云数据，在这里没有对重叠区域进行均匀化处理。

表 6.1 所示为拼接后标志点对之间的距离误差，这个误差值远小于测量系统的测量误差，这说明采用本方法能够较好的实现测量数据的拼接，并且精度完全满足实际的需要。

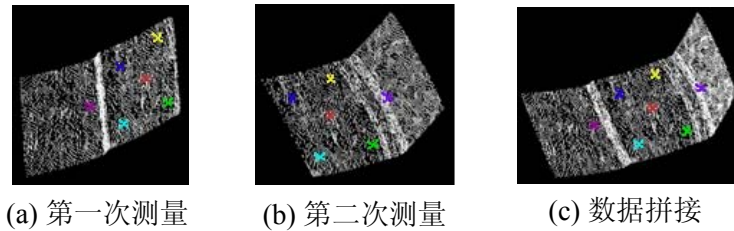


图6.7 数据拼接

表 6.1 标志点拼接误差

点对	1-a	2-b	3-c	4-d	5-e
距离 (mm)	0.0414	0.0406	0.0330	0.0402	0.0440

### 6.3 空间数据的区域分割

一个被测量的物理模型，其外部形状通常是由众多的特征曲面拼接而成，该形状在计算机中很难用一个单一的数学模型来表示，因此需要对空间数据进行区域分割，以获得具有单一几何特征的拓扑结构区域<sup>[169]</sup>。

空间数据的区域分割主要有基于面的方法和基于边的方法，基于面的方法<sup>[170]</sup>通过对连续区域的数据点进行几何计算，如法线、高斯曲率、平均曲率等，认为具有相同属性的点集属于同一个特征曲面，通过特征曲面的求交或其它计算方法来得到曲面的边界。由于测量误差的存在，同时真实物体表面不可能是完全光滑连续的，因此采用该方法很难准确的估算出曲面的边界。基于边的方法<sup>[171][172]</sup>计算数据点在局部区域的几何特性，将一些深度不连续、法线不连续或曲率不连续的点作为特征曲面的边界点。还要一种基于点云三角化的区域分割方法<sup>[173]</sup>，该方法在三角化之后，通过分析三角网格拓扑结构来提取边界，利用边界信息对空间数据进行分割。然而，适应任何数据对象的点云三角化算法还没有得到完全解决，同时，三角化算法本身的时间复杂度高，因此边界提取的效率非常

底。本文根据双目立体视觉所获得的测量数据的特点，直接从点云中提取特征曲面的边界点。

在双目立体视觉测量系统中，利用编码光栅实现了对被测表面进行密集而均匀的分割，因此在不考虑局部遮挡的情况下，所获得的空间数据也是密集而均匀的；同时，如果以其中的一个摄像机坐标系为世界坐标系（在立体标定中也确实是这样做的），则单次测量获得的数据可以很好的投影到摄像机坐标系的  $oxy$  平面上，这一投影过程称为数据预处理。在投影面上依据建立的边界识别准则提取出边界，然后映射到三维空间，从而提取出空间数据的边界信息，实现对空间数据的区域分割。

### 6.3.1 数据预处理

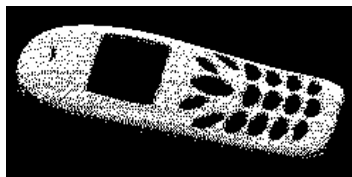
测量所得的数据点一般保存在一个三维数组中。为了方便边界的提取，需要知道数据点之间的邻接关系，因此首先要对数据进行预处理，结果保存在一个灰度图像中，方法如下：

- (1) 遍历所有点，获得  $x, y, z$  坐标的最大值和最小值，分别记为  $x_{\max}, x_{\min}, y_{\max}, y_{\min}, z_{\max}, z_{\min}$ ；
- (2) 根据数据的密集，设定大小为  $M \times N$  的图像，图像中各点的灰度值由式 6.26 计算；

$$\begin{aligned} u_i &= (x_i - x_{\min}) / Dis \\ v_i &= (y_i - y_{\min}) / Dis \\ g_i &= 255 \cdot (z_i - z_{\min}) / (z_{\max} - z_{\min}) + g_{\min} \end{aligned} \quad (6.26)$$

其中， $g_{\min}$  为  $z_{\min}$  对应的灰度值。

图像中的背景点或没有测量数据的点，其灰度为 0。经过预处理，空间数据点与图像平面上像素点存在一一对应的关系，图 6.8 为实测的手机外壳和转换后的灰度图像，其中  $g_{\min} = 55$ 。



(a) 空间数据



(b) 灰度图像

图6.8 数据预处理

### 6.3.2 提取边界特征

预处理后得到的灰度图像，然后可以采用图像处理中的各种边界检测算子来得到边界特征。最常用的方法是计算图像的一阶微分和二阶微分，认为在图像边缘处的一阶微分有最大值，二阶微分过零点。但是在实际应用中由于二阶微分对噪声非常敏感；为了得到可以接受的结果，零交叉点的计算也相当复杂<sup>[94]</sup>；另外，对于大小为 $n \times n$ 的方形掩模，处理后的图像会比原始图像稍小，影响了边缘处的边界特征提取，而图像边缘往往是边界特征最集中的地方。

本文采用频率域的高通滤波来提取边界特征。在图像中，变化最慢的频率成分对应为图像的平均灰度，低频成分对应为图像中变化较慢的分量，更多的对图像中的微小细节有作用；高频成分对应为图像中变化较快的灰度级，表现为图像的轮廓或其他急剧变化的地方，较多的包含了视觉上的重要信息。因此，通过频率域的高通滤波可以有效的抑止或去除图像中的细小的物体，同时使边界更加清晰。频率域中的高通滤波包含如下步骤：

(1) 对原始图像进行中心变换及离散傅立叶变换。

$$\begin{aligned} f_t(u, v) &= f(u, v)e^{j\pi(u+v)} \\ F(\xi, \eta) &= \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} [f_t(u, v)e^{-j2\pi(u\xi/M + v\eta/N)}] \\ \xi &= 0, 1, \dots, M-1; \quad \eta = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (6.27)$$

其中变量 $\xi$ ， $\eta$ 是傅立叶变换的频率变量， $u$ ， $v$ 是图像的空间变量。

(2) 对(1)的结果进行频率域高通滤波，获得图像中的边缘特征。在实际应用中我们选用高斯高通滤波器。

$$\begin{aligned} F_{hp}(\xi, \eta) &= F(\xi, \eta)H(\xi, \eta) \\ H(\xi, \eta) &= 1 - e^{-D^2(\xi, \eta)/2D_0^2} \\ \text{其中, } D^2(\xi, \eta) &= (\xi - M/2)^2 + (\eta - N/2)^2 \\ D_0 & \text{, 截止频率} \end{aligned} \quad (6.28)$$

(3) 对(2)的结果进行反傅立叶变化，并取消输入图像的中心变换，获得高通滤波后的图像。

$$g_t(u, v) = \sum_{\xi=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} [F_{hp}(\xi, \eta) e^{j2\pi(u\xi/M + v\eta/N)}]$$

$$g(u, v) = g_t(u, v) e^{j\pi(u+v)}$$
(6.28)

$$u = 0, 1, \dots, M-1; v = 0, 1, \dots, N-1$$

经过以上的处理步骤，图像中灰度变化剧烈的地方被加强，处理结果较好的包含了被测物体的边界特征，但还是存在一些不理想的地方：

- (1) 边界点的宽度大于一个像素，宽度不均匀，灰度值不均匀；
- (2) 图像中还存在一些孤立的像素点或像素点集。

对于第一种情况，首先用基于全局阈值的门限函数进行一次处理，将它转变为二值图像；然后采用改进的形态学图像处理技术进行细化。细化分两步来实现，第一步是采用正常的图像腐蚀，对可除去的像素点进行标志，但不消除；第二步对标志点作判断，如果该点消除后不改变图像的连通性，则消除，否则应保留该像素点。对于第二种情况，将通过连通区域的查找来消除。连通区域的查找见4.3节。图6.9为对图6.8(b)进行边界提取的结果，其中(a)为高通滤波的处理结果，(b)为二值化及图像腐蚀的结果，(c)为连通区域查找的结果，其中不同的颜色表示不同的连通区域。

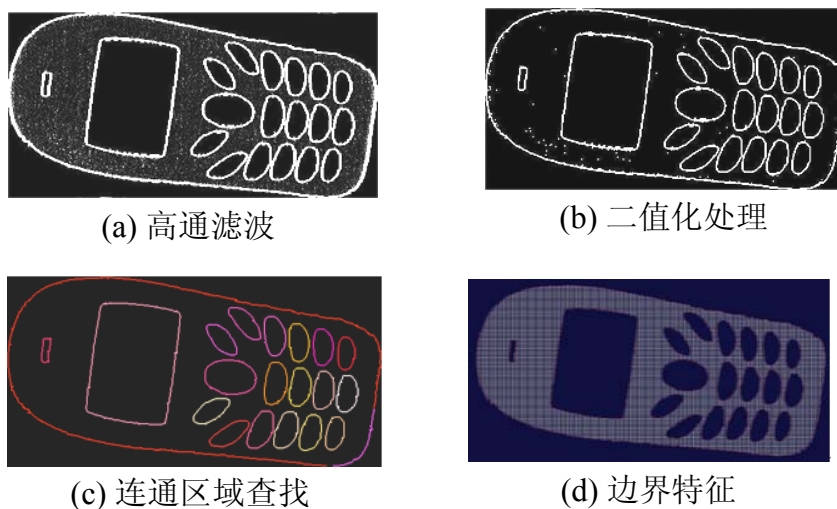


图6.9 边界特征提取

经过上述处理，很好地得到灰度图像的边界特征。根据公式6.26，可以唯一的确定各边界点在三维空间的位置，图6.9(d)为叠加了边界特征之后的空间数据。

## 6.4 本章小结

本章推导了各种误差拼接准则下的三维重建算法,研究了在机械臂平台下的数据测量方法和基于标志点的测量数据拼接方法,提出了一种基于标志点的测量数据自动拼接方法。该方法利用关系匹配自动找出标志点的对应关系,降低了拼接操作的复杂性;应用 Rodrigues 参数表示位姿矩阵,引入中间参数进行分步求解,简化了计算且稳定性好。

本章的最后对空间数据的区域分割作了简单的介绍,针对立体视觉测量系统中单次测量数据的特点,将空间三维数据投影到  $xy$  平面上,通过对灰度图像的边界提取并返回到三维空间,实现了空间数据的区域分割。



## 第7章 系统误差分析与实验研究

在三维测量的过程中，测量值与真实值之间总会存在误差。误差分析是测量技术研究中的一个重要课题。误差分析的任务包括分析误差的来源及其传递规律，减小并修正误差，最终提高测量精度。双目立体视觉测量系统包括光学成像、光电转换、图像处理和计算机视觉等众多软硬件模块，因此最终的误差来源极其复杂，为有效提高系统的测量精度，有必要对系统的各种误差进行全面的分析。

### 7.1 系统的误差来源

在系统的使用流程中需要完成以下工作：硬件设置、图像采集、摄像机标定、图像处理和三维坐标计算，任何一个环节都有可能引入误差，其中最主要的误差来源有：

(1) 光学成像与摄像机标定。由于透镜设计、制造以及装配过程中的缺陷，实际透镜在成像表现为一定的径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变。选用较好的光学镜头，并应用非线性摄像机模型进行内参数标定，能够有效的减小透镜的成像畸变对测量结果的影响。摄像机的外参数可以通过双摄像机的立体标定获得较理想的结果。这部分内容已在摄像机标定部分讨论。

如果系统调节不当导致聚焦不准，会造成成像不清晰；由于物体深度的变换而超出了摄像机的景深范围，也会造成成像模糊；环境光对成像质量也有重要的影响；对表面光学性质不好或不均匀的物体，还需要表面进行适当的处理。可以认为这部分误差都是由于硬件设置不当而引入的，在实际中应注意避免。

(2) 采用和量化。摄像机的图像获取包含了采用和量化过程，它所获得的数字图像是关于物体表面各个离散采样点的二维矩阵，不可避免会引入误差。这个误差包括两个方面，摄像机的分辨率限制了离散采用点的数量，图像上的一个像素点实际对应物体表面上的一个面元；摄像机的采样深度限制了对物体表面灰度值的量化程度，对于给定的采样深度，小的灰度差异可以被忽略，而太大的灰度值会因为无法计量而仅仅记录为采用深度的最大值。

(3) 图像匹配。图像匹配按照一定匹配约束，在立体图像对中查找关于同

一物点的对应像点。但由于实际成像过程非常复杂，同一物点在两个摄像机中的成像不一定完全一样，同时由于噪声、畸变等影响，使得图像的匹配会存在一定的误差。

(4) 计算模型。计算模型描述了立体图像对与空间数据之间的映射关系。但在真实世界中，这种关系是非常复杂，要精确建立它们之间的关系是不大可能或不可行的。因此实际应用的计算模型都作了一些必要的简化，这些简化导致测量结果与真实值之间存在误差。

不同环节引入的误差对结果的影响可能被放大、也可能被缩小。误差的传递及其对最终结果的影响不仅与计算模型有关，还和系统的结构参数有很大的关系。以下将首先讨论系统结构参数对测量精度的影响。

## 7.2 结构参数对精度的影响

建立如图所示的误差分析模型，两摄像机的焦距分别为  $f_1, f_2$ ，物点  $P$  在对应的像点分别为  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$ 。世界坐标系的原点在第一个摄像机的光学中心，沿基线方向为  $x$  轴正向， $y$  轴与第一摄像机的  $y$  轴方向相反，按右手法

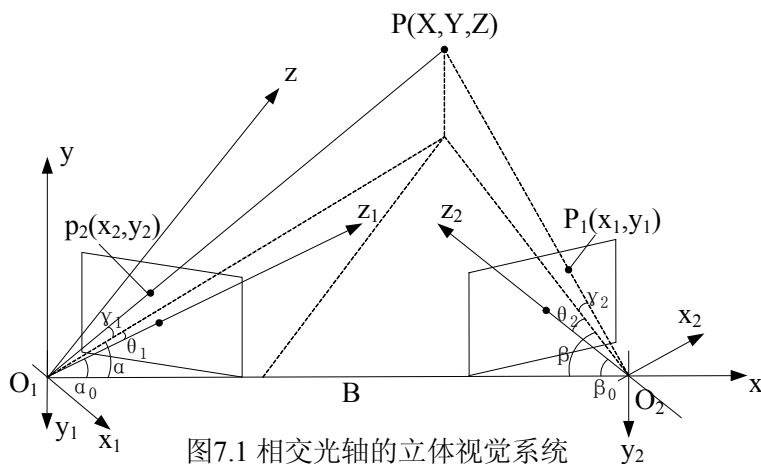


图7.1 相交光轴的立体视觉系统

则建立  $z$  轴。两摄像机光轴方向与  $x$  轴夹角分别为  $\alpha_0, \beta_0$ ，物点  $P$  在两个摄像机中对应的水平、垂直视角分别为  $\theta_1, \gamma_1$  和  $\theta_2, \gamma_2$ 。由几何关系得  $P$  点的坐标为：

$$\begin{aligned} x &= B \sin \beta \cos \alpha / \sin(\alpha + \beta) \\ y &= B \sin \beta \tan \theta_1 / \sin(\alpha + \beta) = B \sin \alpha \tan \theta_2 / \sin(\alpha + \beta) \\ z &= B \sin \alpha \sin \beta / \sin(\alpha + \beta) \end{aligned} \quad (7.1)$$

其中，



$$\alpha = \alpha_0 + \gamma_1$$

$$\beta = \beta_0 + \gamma_2$$

$$\gamma_1 = \arctan(x_1 / f_1)$$

$$\gamma_2 = -\arctan(x_2 / f_2)$$

$$\theta_1 = \arctan(y_1 \cos \gamma_1 / f_1)$$

$$\theta_2 = \arctan(y_2 \cos \gamma_2 / f_2)$$

由式 7.1 可知,  $P$  点坐标是一个关于系统结构参数  $\alpha_0, \beta_0, L, f_1, f_2$  和像点位置的非线性函数, 其中  $x, z$  与  $y_1, y_2$  无关。计算该函数关于  $x_1, x_2, y_1, y_2$  的误差传递函数:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial x_1} &= B \sin(\alpha + \beta) \tan(\alpha + \beta) \sin \alpha \sin \beta \\ \frac{\partial x}{\partial x_2} &= -B \sin(\alpha + \beta) \tan(\alpha + \beta) \cos \beta \cos \alpha \\ \frac{\partial z}{\partial x_1} &= -B \sin(\alpha + \beta) \tan(\alpha + \beta) \cos \alpha \sin \beta \\ \frac{\partial z}{\partial x_2} &= -B \sin(\alpha + \beta) \tan(\alpha + \beta) \sin \alpha \cos \beta \\ \frac{\partial y}{\partial x_1} &= \frac{B \cdot y_1 \cdot \sin \beta \cdot \sin^2(\alpha + \beta) \sqrt{x_1^2 + f_1^2}}{x_1 \cdot \sin^3(\alpha + \beta) - f_1^2 \cdot \cos(\alpha + \beta)} \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} &= \frac{B \cdot y_1 \cdot \sin \beta \cdot \sin^2(\alpha + \beta) \sqrt{x_2^2 + f_2^2}}{x_2 \cdot \sin^3(\alpha + \beta) + f_2^2 \cdot \cos(\alpha + \beta)} \\ \frac{\partial y}{\partial y_1} &= \frac{B \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \sqrt{x_1^2 + f_1^2}} \\ \frac{\partial y}{\partial y_2} &= -\frac{B \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \sqrt{x_2^2 + f_2^2}} \end{aligned} \quad (7.2)$$

设两台摄像机在  $x, y$  方向的提取精度分别为  $\delta x_1, \delta y_1$  和  $\delta x_2, \delta y_2$ , 则  $P$  点在  $x, y, z$  方向的测量精度分别为:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2} \\ \Delta y &= \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y_1} \delta y_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y_2} \delta y_2\right)^2} \\ \Delta z &= \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x_1} \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_2} \delta x_2\right)^2}\end{aligned}\quad (7.3)$$

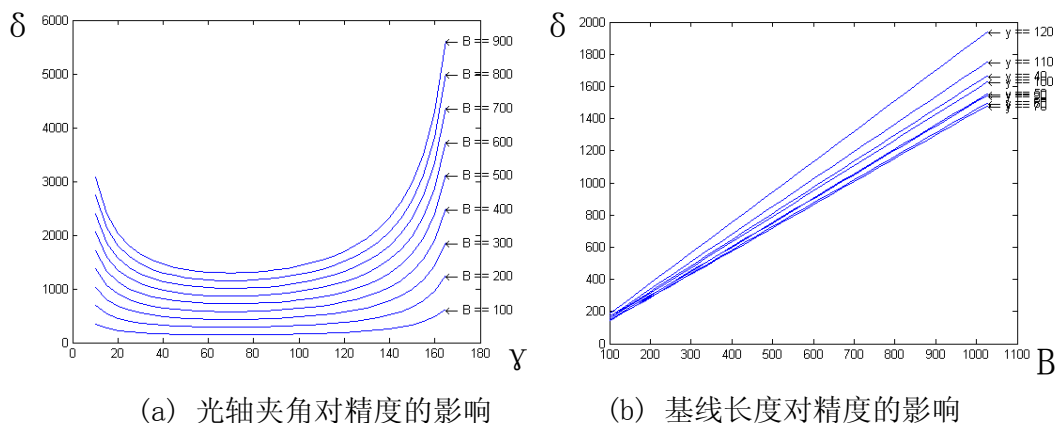
根据误差分析理论， $P$  点的总体测量误差为：

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (7.4)$$

根据以上分析，得出如下结论：

- (1) 焦距越大，测量精度越高。由光学镜头的选择部分知道，焦距越大，摄像机的视角越小，因此选用大的焦距，相当于提高摄像机对物点的分辨率。
- (2) 位于光轴上的点，测量精度最低。
- (3) 基线距离  $B$  越大，精度越低。由于基线距离的增加，摄像机的成像范围变大，相当于摄像机对物点的分辨率降低。

以下将详细分析基线距离和摄像机光轴夹角对测量精度的影响。建立如下的误差实验模型，两摄像机对称分布，即  $\alpha_0 = \beta_0 = \alpha$ ，对于光轴上的物点，假设其像点在第一幅图像上被精确定位，在第二图像平面的水平或垂直方向可能存在  $\pm 1$  像素的误差。在存在匹配误差的情况下，求解  $P$  点的空间位置，用距离误差的均值作为综合误差。



(a) 光轴夹角对精度的影响

(b) 基线长度对精度的影响

## 7.2 结构参数对精度的影响

图 7.2 (a) 所示为光轴夹角对测量精度的影响，横轴表示光轴之间的夹角，纵轴为测量误差，其中共 9 条曲线，对应不同的基线距离，从下到上依次为基线

距离  $B = 100, 200, \dots, 900$ 。从图中可以看出, 在其它条件不变的情况下, 基线距离越大, 测量误差越大; 光轴夹角  $\gamma = 180^\circ - 2\alpha$  对误差的影响类似澡盆曲线,  $\gamma$  在  $40^\circ \sim 120^\circ$  范围时误差较小且变化平缓; 对于不同的基线距离, 光轴夹角在  $70^\circ$  左右时误差最小, 这一结论与文献<sup>[174]</sup>的结论基本一致:  $k = B/Z = 1.3$  时综合误差最小, 这里  $B$  为基线距离,  $Z$  为两光轴交点的  $z$  坐标。

图 7.2 (b) 所示为基线长度对测量精度, 横轴表示基线长度, 纵轴为测量误差, 根据图 (a) 的结论, 我们重点分析光轴夹角在  $40^\circ \sim 120^\circ$  范围内的误差变化趋势, 共 9 条曲线, 从下到上对应的光轴夹角  $\gamma = 70, 80, 60, 90, 50, 100, 40, 110, 120$ 。从图 (b) 可以看出, 基线长度与测量误差几乎是线性增加的关系; 而光轴夹角对误差的影响是非线性的, 表现为图中相邻直线间的夹角变化并不均匀。

经过以上关于系统结构参数与误差的关系分析, 以及 2.2 节对摄像机有效视差的分析, 可以制定系统结构参数选择的基本步骤:

- (1) 选择光轴夹角  $\gamma = 70^\circ$ 。由图 7.2 可知, 此时匹配误差对结果的影响最小, 它对应的摄像机光轴与基线的夹角为  $55^\circ$ 。
- (2) 根据需要, 确定系统的测量范围, 进一步可确定公式 2.3 中的  $R$ ;
- (3) 综合考虑测头尺寸和可选的镜头焦距系列, 根据公式 2.3 选择合适的光学镜头和基线距离。在精密测量中考虑到镜头畸变等的影响, 通常选用的镜头焦距系列有  $f = 12mm, 16mm, 25mm, 50mm$ 。

### 7.3 标定误差分析

摄像机标定是确定摄像机内参数矩阵和外参数矩阵的过程, 通过标定可以建立像点坐标与物点坐标之间的正确关系, 使系统的测量达到一定的精度。标定的精度是指物点、像点之间的关系的精确程度, 通常从以下三个方面进行判定:

- (1) 标定点坐标反算对比。利用标定得到的摄像机参数及标定点的图像坐标, 计算它们在空间的三维坐标, 并与标定点的真实值对比。
- (2) 标定点重投影坐标对比。利用标定获得的摄像机参数, 投影标定点到摄像机的图像平面, 获得其像点坐标, 并与实际像点坐标对比。

(3) 基准长度对比。利用标定获得的摄像机参数，对一基准长度进行测量，获得测量值与真实值之间的误差。

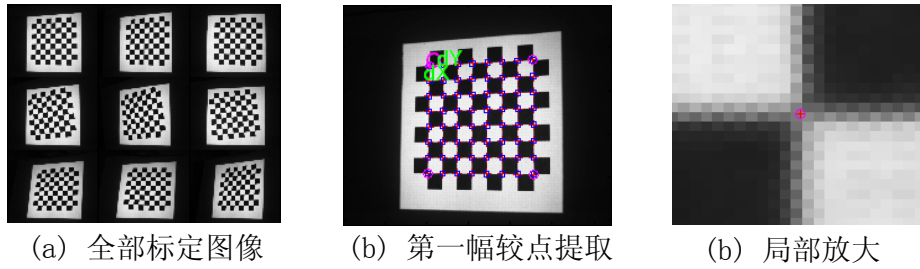


图7.3 标定图像

本文采用 Zhang 标定方法对单摄像机进行标定，并通过立体标定精确计算两摄像机的相对位姿。标定板为黑白相间的棋盘，共 9 行 9 列，棋盘上黑白方格的大小为  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，标定板的每一个位姿可以提供 64 个标定点。图 7.3 所示为摄像机获取标定板图像，其中 (a) 为左摄像机获取的全部图像，(b) 为右摄像机获取的全部图像。表 7.1 所示为左右摄像机的标定结果，表中  $M1, M2, D$  分别表示内参数矩阵、外参数矩阵和透镜畸变系数。

表 7.1 左右摄像机标定结果

	左摄像机				右摄像机			
M1	2302.17	0	659.41	0	2294.37	0	572.02	0
	0	2306.78	557.92	0	0	2295.72	565.33	0
	0	0	1	0	0	0	1	0
M2	$E$				0.853	0.005	-0.522	369.98
					-0.012	1.0	-0.011	-0.630
					0.522	0.015	0.853	77.24
					0	0	0	1
D	-0.05629	-0.72440	0.00453		-0.05133	-0.24390	0.00171	
	0.00355	0.00000	0.00000		-0.00556	0.00000	0.00000	

下面我们对摄像机的标定结果进行精度评定。图 7.4 (a) 为第一个摄像机采集的第一幅图像的重投影误差分布，重投影在  $u, v$  方向的均方差（以像素为单位）分别为： $\sigma_u = 0.18034, \sigma_v = 0.12537$ ；(b) 利用三维立体标定结果进行三维重建的误差分布，三维重建在  $x, y, z$  方向的均方差（以毫米为单位）分别为： $\sigma_x = 0.0246, \sigma_y = 0.0185, \sigma_z = 0.0472$ 。图 7.4 (c) 为第二个摄像机采集的第

一幅图像的重投影误差分布，重投影在 $u,v$ 方向的均方差（以像素为单位）分别为： $\sigma_u = 0.21245, \sigma_v = 0.14423$ ；(d) 为利用三维立体标定结果进行三维重建的误差分布，三维重建在 $x,y,z$ 方向的均方差（以毫米为单位）分别为： $\sigma_x = 0.0317, \sigma_y = 0.0876, \sigma_z = 0.0497$ 。

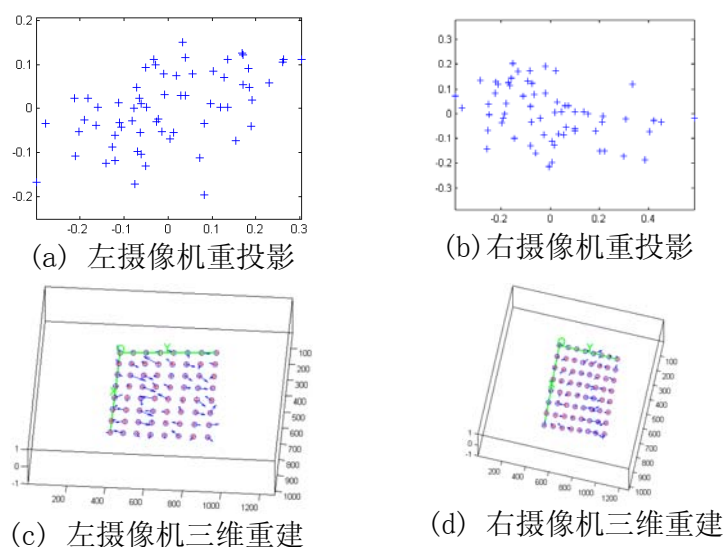
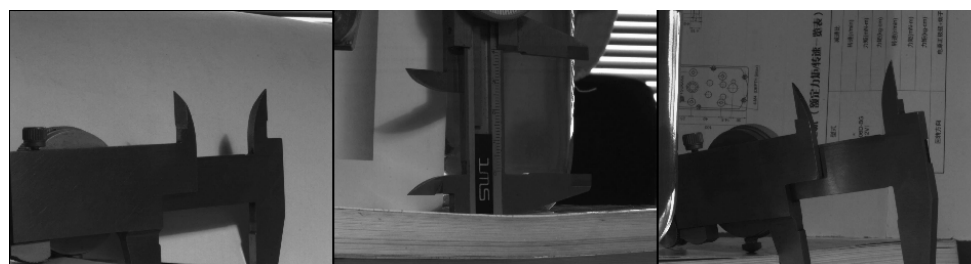


图7.4 标定精度评定

图 7.5 所示是以游标卡尺为测量对象进行基准长度对比，卡尺的实际长度为 40mm，图中第一、第二行分别为左摄像机、右摄像机获取的图像，第一、二、三列分别卡尺大致处在 $x,y,z$ 三个不同方向时的立体图像对。表 7.2 为三个方向上反求结果及其误差。



(a) 左摄像机图像



(b) 右摄像机图像

图7.5 游标卡尺基准长度测量

表 7.2 基准长度测量及误差

	x1	x2	y1	y2	z1	z2	d	$\delta$
1	28.0440	67.8264	51.6330	54.3848	-2.3737	0.0706	39.9339	0.0561
2	12.3309	12.4939	17.5759	57.1127	20.2152	25.9312	39.9482	0.0518
3	25.7480	32.2040	53.6640	61.4909	10.4993	-28.1444	39.9534	0.0466

标定结果的误差分析表明,本文所采用的摄像机标定方法是正确的、有效的。

## 7.4 图像匹配的精度

影像相关技术是目前应用最为广泛的图像匹配技术,采用该方法进行图像匹配是,与目标区域等大小的窗口在搜索区域移动,对搜索区域内的像素点依次逐个进行相关系数计算,其中最大相关系数所在的区域中心被认为是最佳匹配点。但由于图像采样时的差别,即使在没有错误匹配的情况下,所找的匹配点也可能和真实的同名点之间存在 0.5 个像素的误差,因而其匹配的均方差为:

$$\sigma_x^2 = \int_{-0.5}^{+0.5} x^2 p(x) dx \quad (7.5)$$

其中  $p(x)$  为  $[-0.5, +0.5]$  内的均匀分布, 即:

$$p(x) = \begin{cases} 1 & x \in [-0.5, +0.5] \\ 0 & \end{cases} \quad (7.6)$$

因此图像匹配的均方差为:

$$\sigma_x^2 = 1/12 \approx 0.29 \quad (7.7)$$

对于整数像素的图像匹配,其理论匹配精度为 1/3 个像素。

如果以最佳匹配点及其前后两点的相间系数作抛物线拟合,以抛物线最高点的像素坐标为对应点,可提高图像匹配的精度。设抛物线的方程为:

$$f(\rho) = A + B\rho + C\rho^2 \quad (7.8)$$

则:

$$\begin{aligned} A &= \rho_i \\ B &= (\rho_{i-1} + \rho_{i+1})/2 \\ C &= (\rho_{i-1} - 2\rho_i + \rho_{i+1})/2 \end{aligned} \quad (7.9)$$

其中,  $i$  为整数像素匹配时获得的最佳匹配点的坐标,  $\rho_i, \rho_{i-1}, \rho_{i+1}$  为点  $i$  及

其前后点的相关系数。

抛物线的顶点坐标为：

$$\rho = i - \frac{B}{2C} = i - \frac{\rho_{i+1} - \rho_{i-1}}{2(\rho_{i+1} - 2\rho_i + \rho_{i-1})} \quad (7.10)$$

由上式可见，对于信噪比较高的图像，由于相关系数之间有明显的差异，通过抛物线拟合可以有效提高图像匹配的精度。

## 7.5 拼接误差分析

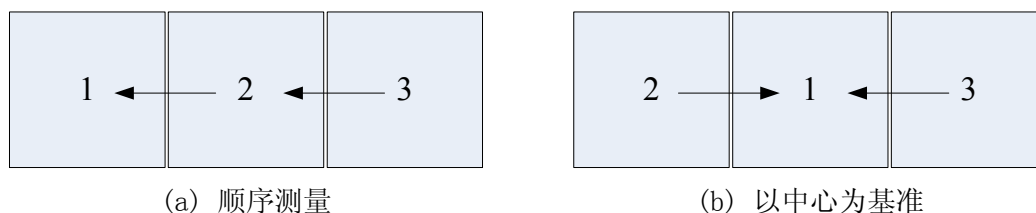
由于系统测量范围的限制或被测表面的互相遮挡，在多数的测量过程中都需要进行数据拼接，拼接使得单次的测量误差被传递，最终影响了整体的测量精度和可靠性。

在目前的各种数据拼接方法中，基于精密机构的测量数据拼接是目前精度最高的一种方法。该方法通过精确控制测量系统或物体的运动，由控制系统给定运动参数，通过标定获得运动系统的坐标系与测量系统之间坐标系的位姿关系（简称位姿关系），可以较精确的实现多次测量数据的自动拼接。该方法的主要优点是拼接过程自动完成，并且多次拼接没有累积误差。影响拼接精度的主要因素是控制系统的运动精度和位姿关系的标定精度，与单次测量的精度和测量次数没有关系。

基于 ICP 算法和基于标志点的方法不需要庞大、昂贵的运动平台，实现较方便。影响这两种拼接方法精度的主要原因包括单次测量的精度、重叠区域的大小和拼接次数。ICP 算法根据预先指定的对应点及其领域，计算点云的几何特性，通过迭代计算获得拼接数据之间的位姿变换矩阵。单次测量的精度将影响点云几何特性计算的准确性，从而影响对应点查找的精度。基于标志点的拼接方法，其标志点的对应关系是确定的，单次测量的精度将影响标志点的定位的精度。重叠区域的大小主要影响位姿变换矩阵的求解精度，在各对应点的位置误差一定的情况下，重叠区域越大，矩阵求解的精度越高。但重叠区域太大，减小了有效的测量面积，增加拼接次数，最终的精度却很难提高，同时位姿变换矩阵求解的时间成本也增加。

测量顺序的合理安排也能减小最后的拼接误差。以测量一个细长工件为例，

如果安装图 (a) 的测量和拼接顺序, 第三次测量所获得的数据将存在较大的累积误差。图 (b) 为改进后的测量策略, 工件的最终结构只存在单次的拼接误差。因此测量过程中应选择合适的拼接路径, 尽量减少最终结果的累积误差。



### 7.3 不同的测量顺序

## 7.6 操作不当

在测量系统性能基本稳定的情况下, 人员的操作失误或调整不当是测量误差的主要来源。在双目立体视觉测量系统中, 操作不当包括硬件搭配不合理, 被测表面预处理不当等。

对于大面积的测量对象, 应选择测量范围较大的光学镜头和硬件参数, 以实现总体数据的快速采集。如果系统的测量范围太小, 必然增加了测量数据的拼接次数和测量的时间跨度, 从而影响最终测量结果的精度; 并且多次拼接要求较多标志点, 这样会在测量数据表面留下较多的空白区域, 增加后续工作的难度。

基于光学原理的测量设备, 要求被测表面的发射性能均匀, 如果表面某些区域发光过强或过弱, 将无法测量甚至影响到其它区域的测量精度。因此, 对于表面发射性能不好的物体要进行均匀的喷涂处理, 以形成较理想的漫反射效果。

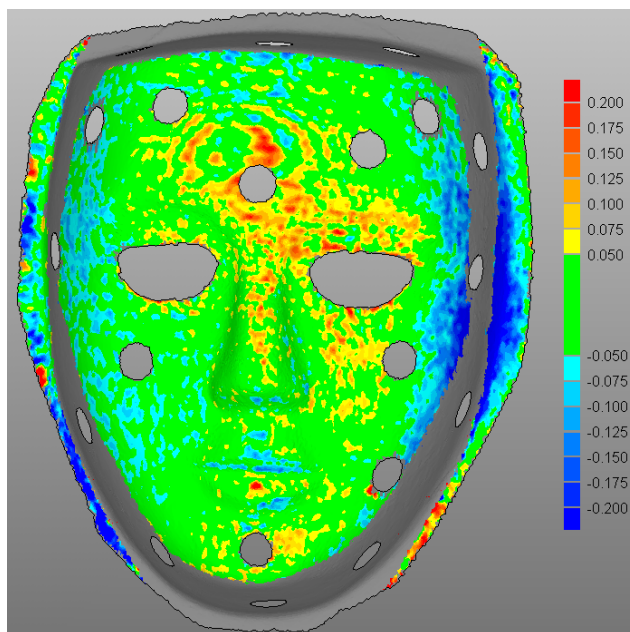
## 7.7 现有世界水平测量设备的精度比较

为验证系统的测量精度, 我们选用了德国 GOM 公司的 ATOS STD 产品进行对比实验。GOM 是一家世界著名的非接触式测量设备生产公司, 该公司的 ATOS 产品系列在全球已有 700 多家用户, ATOS STD 是其中应用较为广泛的一个型号, 它的单次测量范围为  $175 \times 135 \times 135 \sim 800 \times 600 \times 600$  (mm), 测量精度  $0.01 \sim 0.08$  (mm), 基本能够满足一般工业设计和逆向工程的应用需求。

用于测量和比较的对象是大小约  $240 \times 160 \times 165$  (mm) 的人脸模型, 模型上既有变化平缓的区域, 如额头、脸颊等, 也有变化剧烈的区域, 如鼻梁、眉骨



等，属于比较典型的自由曲面模型。结果比较采用的软件为 Geomagic Studio5.0，计算过程全部采用该软件的自动计算功能，基本消除了人为因素对精度对比过程的影响，操作包括以下步骤：用 ATOS 测量用于比较的对象，ATOS 得出的测量结果为三角化网格，在 Geomagic 中打开结果文件；用本系统测量，导入测量结果；用“best fit alignment”命令对齐两个系统的测量数据；用“3d compare”命令比较测量数据。图 7.4 为两个系统的测量结果对比，图中的圆形空白为用于拼接的标志点留下的空白区域。从图中可以看出，其中大部分点的偏差在 0.05mm 以内，软件统计的平均偏差为：0.0748mm，标准偏差为：0.0806mm。



7.4 本系统与ATOS的结果比较

## 7.8 本章小结

本章对立体视觉测量系统的误差做了全面的分析，从系统的角度分析了系统可能的误差来源和成因。重点研究了系统结构参数对测量精度的影响，建立了系统结构参数选择的基本步骤；并采用三种不同的方法验证了本文标定算法的精度，结果证明本文的标定算法的精度是可靠的。在本章的最后，通过对比实验验证了原型系统的精度，结果表面该系统的测量精度与世界级水平的测量设备的差距很小，能够达到反求工程测量应有的精度要求。



## 第8章 总结与展望

### 8.1 全文总结

三维数据点的采集是逆向工程中的一项关键技术,目前已有的数据采集设备都存在明显的不足或只能适用于一定的应用要求。在复杂自由曲面的三维重建中,需要快速、高精度地获取大量关于曲面形状的数据点,双目立体视觉测量系统正好能满足这方面的要求。本文采用编码光与双目立体视觉技术相结合的方法对物体表面三维坐标进行测量,通过对大量文献的阅读、分析及实验对比,对双目立体视觉测量系统的若干关键技术进行了深入的研究,力求在理论和系统实现上有所创新和发展。本文的工作要点和创新体包括:

(1) 先有的摄像机标定主要是针对单个摄像机的内外参数标定,由于存在标定误差,用两个单独标定的摄像机进行立体视觉测量时,其外参数的标定误差必然会引起较大的测量误差。针对这个问题,本文提出一种立体摄像机标定方法,该标定方法以空间标定点的三维重建误差最小为目标函数,对双摄像机的相对位置进行标定。

(2) 针对立体视觉测量系统中一些较重要的图像基本特征分析方法进行研究,主要包括标定棋盘较大的亚像素提取、拼接标志点的中心提取、编码图像的二值化、彩色和黑白图像的区域分割。通过图像的区域分割较好的消除了最终测量结果中的无效数据点。

(3) 图像匹配是立体视觉的难点,本文针对立体图像对之间的灰度变化和几何变形,提出了一种由粗到细、逐步求精的图像匹配方法。该方法首先应用编码光实现图像对的粗匹配,然后应用粗匹配结果估计两匹配窗口之间的灰度变化和几何变化,实现图像的精确匹配。

(4) 推导了不同误差评价准则下的空间点三维重建的基本公式;针对立体视觉测量系统的特点,提出了一种基于标志点的点云数据拼接方法。该方法利用关系匹配自动找出标志点的对应关系,降低了拼接操作的复杂性;应用 Rodrigues 参数表示位姿矩阵,引入中间参数进行分步求解,简化了计算且稳定性好。

(5) 对系统的误差来源做了全面的分析,讨论了结构参数对测量精度和有

效视场的影响，制定系统结构参数选择的基本步骤。

(6) 在以上研究工作的基础上，选择了合适的软硬件方案，开发了一套原型系统，通过对比实验对该系统做了精度验证。结果表明该系统的测量精度与世界级水平的测量设备的差距很小，能够达到反求工程测量应有的精度要求。

## 8.2 工作展望

本文将编码光方法和双目立体视觉测量技术相结合，为提高系统的测量精度，对其中的若干关键技术进行了研究，并取得了一定成果，但仍然有许多方面需要进行持续研究：

(1) 图像匹配过程中，窗口的大小对匹配的精度和速度都有影响，如何在保证匹配精度的情况下，根据立体图像的实际情况自适应的调整窗口的大小，以提高图像匹配的精度。

(2) 编码图案的投影质量对图像匹配的速度和精度都有影响，可以考虑开发专门的投影系统，以获得较高质量的投影图案；通过同步装置控制左右摄像机及投影设备的工作，以提高图像采集的速度。

(3) 针对测量数据的后处理进行专门的研究，如重叠区域的均匀化处理、点云数据简化等。

## 参考文献

- [1] Frank Chen, Cordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, 2000.1, 39(1), p10~22.
- [2] B. K. P.Horn. shape from shading: a method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. Ph.D. dissertation, MIT, Cambridge, 1970.
- [3] Ruo Zhang, et al. Shape from shading: a survey. *IEEE Trans PAMI*, 1999, 21 (8), p690~706.
- [4] Ryan White and David A.Forsyth. Combining cues: shape from shading and texture. *IEEE CVPR2006*, 2, p1809~1816.
- [5] D. Marr. Vision-a computational investigation into the human representation and processing of visual information. Rreeman, San Francisco, 1982.
- [6] A. Witkin. recovering surface shpe and orientation from texture. *Artificial Intelligence*, 1987, 17, 17~45.
- [7] A. Blake and C. Marinos. Shape from texture: estimation, isotropy and moments. *Artificial Intelligence*, 1990, 45(3), p323~38.
- [8] 孙斌. 人类视觉与计算机视觉的比较. *自然杂志*, 2002, 24 (1): 51~55.
- [9] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. Ms Technical report MSR-TR-98-71.
- [10] 孟晓桥, 胡占义. 一种新的基于圆环点的摄像机自标定方法. *软件学报*, 2002, 13 (5), p957~965.
- [11] Yihong Wu, Haijiang Zhu, Zhanyi Hu, Fuchao Wu: Camera Calibration from the Quasi-affine Invariance of Two Parallel Circles. *ECCV (1) 2004*: 190~202.
- [12] S. D. Ma. A self-calibration technique for active vision system, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1996, 1.
- [13] Daniel Scharstein and Richard Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. MS Technical Report

- MSR-TR-2001-81.
- [14] 张吉华. 激光三角法轮廓测量. 天津大学学报, 1995, 28 (2), p265~269.
- [15] 王晓东. 空间机器人激光测距传感器系统的研制. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1995.
- [16] R. A. Jarvis. A perspective on range finding technique for computer vision, IEEE Trans. PAMI, 1983, 5 (2), p122~139.
- [17] 魏振忠, 张广军, 徐园. 一种线结构光视觉传感器标定方法. 机械工程学报, 2005, 41 (2), p210~214.
- [18] 解则晓, 张成国. 线结构光测头外参数的精确标定方法. 机械工程学报, 2005, 41 (8), p218~222.
- [19] 解则晓, 张成国, 张国雄. 线结构光测量数据的自动拼合方法. 中国机械工程, 2005, 16 (9), p775~778.
- [20] 张可. 基于双目立体视觉原理的自由曲面三维重构. 华中科技大学, 2005.
- [21] E. Mouaddib et al. Recent progress in structured light in order to solve the correspondence problem in stereo vision. Proc. of the 1997 IEEE Int. conference on Robotics and Automation, p130~136, USA, 1997.
- [22] 马彦霞, 陈玉国, 司爱国. PLC 中将格雷码转换成二进制码一种运算方法. 微计算机信息, 2006, 22 (10), p100~101.
- [23] 沙吉乐. 基于液晶光栅技术的三维视觉测量系统研究. 天津大学博士学位论文, 2003.
- [24] <http://www.digitalmanu.com/tech.htm>
- [25] 樊强等. 光学三维测量中结构光栅投影系统的开发. 光电工程, 2005, 32 (10), p66~69.
- [26] 刘志健等. 彩色伪随机编码闪光投影仪及其像质分析. 合肥工业大学学报, 2004, 27 (10), p1119~1122.
- [27] R. Furukawa, H. Kawasaki. Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning. 3-D Digital Imaging and Modeling, 2005, p302~309.
- [28] omislav Pribani, Mario Cifrek, Stanislav Peharec. Light Plane Position Determination for the Purpose of Structured Light Scanning. Industrial

- Electronics, 2005, p1315~1319.
- [29] 张勇斌, 卢荣胜, 费业泰. 机器视觉中彩色伪随机编码投影系统及标定. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36 (1), p59~62.
- [30] Kang Sing Bing, et al. A Multibaseline stereo system with a active illumination and real-time image acquisition. Proc. of IEEE Int. Conference on Computer Vision, p88~93, USA, 1995.
- [31] R. J. Valkenburg and A. M. McIlvor. Accurate 3d measurement using a structured light system. Image and Vision Computing, 1998, 16 (2), p99~110.
- [32] Daniel Scharstein and Richard Szeliski. High-accuracy stereo depth maps using structured light. CVPR 2003, 1, p195~202,, USA, 2003, 6.
- [33] <http://www.gom.com/>
- [34] K. L. Boyer and A. C. Kak. Color-encoded structured light for rapid active ranging. IEEE Trans. PAMI, 1987, 9 (1), pp14~28.
- [35] C. Chen, Y. Hung et al. Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision. Image and Vision Computing, 1997, 15, p445~456.
- [36] M. Ito and A. Ishii. A three-level check board pattern projection method for curved surface measurement. Pattern Recognition, 1995, 28 (1), p27~40.
- [37] L. Zhang, B. Curless, and S. M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. Int. Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, p24~36, Italy, 2002.6.
- [38] Jordi Pages et al. Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling. Int. Confer. on Robotics and Automation , 2003, 133~138.
- Proceedings of the 2003
- [39] R. J. Valkenburg and A. M. McIlvor. Accurate 3d measurement using a structured light system. Image and Vision Computing, 16 (2), 1998, p99~110.
- [40] 李晓星, 康绍峥, 周贤宾. 立体视觉与空间编码技术相结合的非接触三维曲面测量系统. 中国机械工程, 2004, 15(9), p806~809.
- [41] D. Caspi, N. Kiryati and J. Shamir. Range imaging with adaptive color structured light. PAMI, 1998, 20(5), p470~480.
- [42] Jens Guhring. Dense 3-d surface acquisition by structured light using

- off-the-shelf components. Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement. 2001, p220~231.
- [43] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz. Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects. The 8th IEEE Int. Conf. on computer Vision, 2001, p359~366.
- [44] 孙军华, 魏振忠, 张广军. 一种高密度光栅结构光编码方法. 光电工程, 2006, 33 (7), p78~82.
- [45] Horn, E. Kiryati, N. Toward optimal structured light patterns. 3-D Digital Imaging and Modeling, 1997. Proceedings., Int. Confer. on Recent Advances in Digital Object Identifier. 1997, 8, p28~35.
- [46] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou. Calibration of stereo cameras using a non-linear distortion model. Proc. Int. Confer. on Pattern Recognition, p246~253, 1990.
- [47] Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE journal of Robotics and Automation, 1987 3 (4), 323~343.
- [48] O. D. Faugeras and G. Toscani. Camera calibration problem for stereo. CVPR, 1987, p240~247.
- [49] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou. Calibration of stereo cameras using a non-linear distortion model. ICPR, 1990, p246~253.
- [50] 孙凤梅, 胡占义. 摄像机简化模型对三维重构的影响——分析与实验. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17 (10), p2257~2262.
- [51] G. Q. Wei and S. D. Ma. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiment. PRMI, 1994, 16 (5).
- [52] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. Technical Report MSR-TR-98-71.
- [53] Huang Hai-Yuan, Qi Fei-Hu. A genetic algorithm approach to accurate calibration of camera. J. Infrared Millim Waves. 2003, 29 (1), p1~6.
- [54] Ke Zhang, Bin Xu, Lixin Tang. Modeling of binocular vision system for 3D reconstruction with improved genetic algorithms. International



Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005.10.

- [55] Hartley R. Estimation of relative camera positions for uncalibrated camera. ECCV, 1992, p387~579.
- [56] Faugeras O.D. What can be see in three dimensions with an uncalibrated stereo rig. ECCV, 1992, p123~151.
- [57] 吴福朝, 阮宗才等. 非线性模型下的摄像机自标定. 计算机学报, 2002 25 (3), p276~283.
- [58] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机标定综述. 自动化学报, 2000, 26 (1), p43~55.
- [59] 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述. 中国图象图形学报, 2005, 10 (3), p269~274.
- [60] 孙龙, 胡茂林, 张长耀. 移动车辆上全方向摄像机的 3D 环境识别. 计算机应用研究, 2006, 23 (10), p163~165.
- [61] FERREIRA A, CASSIER C, HIRAI S. Automatic microassembly system assisted by vision servoing and virtual reality[J].IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(2): 321-333.
- [62] B. Julesz. Binocular depth perception of computer-generated patterns. The bellsystem technical journal 39 (5), p1125~1162.
- [63] D. Marr, T. Poggio. Cooperative computation of stereo disparity. Science 1994, p283~287.
- [64] 图像处理、分析与及其视觉. 艾海舟, 武勃等译. 人民邮电出版社, 2003.9.
- [65] S. Carlsson. Combinatorial geometry for shape representing and indexing. Object Representation in Computer Vision II, 1996, p53~78.
- [66] 张超. 树木影像特征提取与立体匹配技术研究. 中国林业科学研究院博士学位论文, 2003.
- [67] 王慧燕. 图像边缘检测和图像匹配研究及应用. 浙江大学博士学位论文, 2003.
- [68] 朱永松, 国澄明. 基于相关系数的相关匹配算法的研究. 信号处理, 2003, 19 (6), p531~534.

- [69] 周颖, 程荫杭. 基于曲线拟合的地图匹配算法. 交通运输系统工程与信息, 2004, 2(4), p68~70.
- [70] 杜歆, 厉晓华, 顾伟康, 丁蒋霖. 区域法立体匹配的实时性问题研究. 浙江大学学报: 理学版, 2003, 30 (6), p628~631.
- [71] 马洪超, 李德仁. 基于空间统计学的空间数据窗口大小的确定. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26 (1), p18~23.
- [72] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.1.
- [73] Rimón Elias. Wide baseline matching through homographic transformation. Proceeding of the 17th ICPR, 2004.
- [74] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2), p91~110.
- [75] B. Herbert, F.Vittorio. Wide-baseline stereo matching with line segment. Proceeding of CVPR, 2005, P329~336.
- [76] S. Carlsson. Combinatorial geometry for shape representing and indexing. Object Representation in Computer Vision II, 1996, p53~78.
- [77] Boaz J. Super and William N. Klarquist. Patch-based Stereo in a General Binocular Viewing Geometry. IEEE Trans. on PAMI 1997, 19 (3), p247-253.
- [78] M. KASS, A. WITKIN, D. TERZOPOULOS. Snakes: active contour models. International Journal of Computer Vision, 1988, 1 (4), p321~331.
- [79] H Loaiza, J Triboulet, S Lelandais et al. Matching segments in stereoscopic vision. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2001, 3, p37-42.
- [80] Gong, M. Yee-Hong Yang. Fast stereo matching using reliability-based dynamic programming and consistency constraints. Proceeding of 9th ICCV, 2003, P610~617.
- [81] 江万寿, 郑顺义, 张祖勋, 张剑清. 航空影像特征匹配研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28 (5), p510~513.
- [82] Moreau, G. Fuchs, P. Doncescu, A. Regis, S. Dense stereo matching method using a quarter of wavelet transform. ICIP, 2002, P261~264.
- [83] Zhang, Y. A Hierarchical Neural Network Approach to Three-Dimensional Object Recognition. Inter. Archives of PRS, 1996, p1010~1017.

- [84] Tsang, P.W.M., Yu, Z. Genetic algorithm for model-based matching of projected images of three-dimensional objects. Proceeding of Vision, Image and Signal Processing, 2003, p351~359.
- [85] G. Linda et al. computer vision. 中译本, 计算机视觉, 赵清杰等译, 机械工业出版社, 2005.3.
- [86] A. David, Forsyth, Jean Ponce. Computer vision: a modern approach. 中译本, 计算机视觉——一种现代方法. 林学闾, 王宏等译, 电子工业出版社, 2004.6.
- [87] 刘志刚, 陈康宁. 三维视觉传感器多视角曲面测量数据的一种配准拼接方法. 机器人, 1999, 21 (6), p415~420.
- [88] QingDe Li, J. G. Griffiths. Iterative closest geometric objects registration. Compute & mathematics with applications, 2000, 40, p1171~1188.
- [89] 沈海平, 达飞鹏, 雷家勇. 基于最小二乘法的点云数据拼接研究. 中国图象图形学报, 2005, 10 (9), p1112~1116.
- [90] D.P.Luebke. A developer's survey of polygonal simplification algorithms. IEEE Computer Graphics & Applications, 2001, p24~35.
- [91] 瞿建武, 李江雄, 柯映林. 基于实物的复杂曲面零件反求工程中未知区域测量数据补充及曲面重构技术. 机械工程学报, 2002, 38 (9), p110~117.
- [92] M. Pauly et al. Multi-scale feature extraction on point-sampled surfaces. Eurographics'03, p32~41.
- [93] I.Soderkvist. Introductory overview of surface reconstruction methods. Research report, department of Mathematics, Lulea University, Sweden, 1999.
- [94] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital image processing. 中译本, 数字图像处理. 阮秋琦, 阮宇智等译, 电子工业出版社, 2003.3.
- [95] 李弼程, 彭天强, 彭波. 智能图像处理技术. 电子工业出版社, 2004.7.
- [96] Traj Kovicm, Headley M. Fast conrner detection. Image and Vision computing, 1998, 16 (1), p75~87.
- [97] 陈乐, 吕文阁, 丁少华. 角点检测技术研究进展. 自动化技术与应用, 2005, 24 (5), p1~8.
- [98] Jones Ronald, Svalbe Imants. Morphological filtering as template matching. IEEE Trans. on PAMI, 1994, 16 (4), p438~443.

- [99] 艾逢, 王永强, 于德敏, 许增朴. 机器视觉复杂平面边缘角点的高精度定位方法. 微计算机信息, 2006, 22 (12), p310-312..
- [100] Mikolajczyk K, Schmid C. An affine invariant interest point detector[Z]. European Conference on Computer Vision, Copenhagen, Denmark, 2002.
- [101] SMITH SM, BRADY JM. SUSAN-a new approach to low level image processing. Journal of Computer Vision, 1997, 23 (1), p45~78.
- [102] Jun yan, Xiaobo li. Using mathematical morphology. Pattern Recognition Letters, 1995, 16, p1277~1286..
- [103] Forstner W. A. A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching. International Society for photogrammetrs and Remote Sensing, 1986.
- [104] Harris C. etal, A combined corner and edge detector. Proc. of the Fourth Alvey Vision Confer, 1988, p147~151.
- [105] Ouyang Cheng etal. Evaluating Harris Method in Camera Calibration. Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Confer., 2005, p6383~6386.
- [106] 冯文灏. 工业测量, 武汉大学出版社, 2004.10.
- [107] 马扬飏, 钟约先, 郑聆, 袁朝龙. 三维数据拼接中编码标志点的设计与检测. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46 (2), p169~171.
- [108] X. Descombes, J. Zerubia. Marked point process in image analysis. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19 (5), p77~84.
- [109] N. Ramesh, J. H. Yoo, and I. K. Sethi. Thresholding based on histogram approximation. IEE Proc. Vision Image Signal Process, 1995, p271~279.
- [110] D. E. Lloyd. Automatic target classification using moment invariant of image shapes. Technical Report, RAE IDN AW126, Farnborough, UK, 1985.
- [111] Otsu N A. Threshold selection method from grey-level histograms. IEEE Trans. Syst, Man, Cybern, 1979, p62-66.
- [112] L. Li, J. Gong, and W. Chen., Gray-level image thresholding based on fisher linear projection of two-dimensional histogram. Pattern Recogn., 1997, 30, p743~749.
- [113] Bernsen J. Dynamic thresholding of gray-level images. Proceedings of the 8th Int. Confer. on Pattern Recognition. IEEE Computer Society Press, 1986,

p1251~1255.

- [114] 张毅军, 吴雪菁. 二维熵图像阈值分割的快速递推算法. 模式识别与人工智能, 1997, 10 (3), p259~264.
- [115] N. Friel and I. S. Molchanov. A new thresholding technique based on random sets. Pattern Recogn, 1999, 32, p1507~1517.
- [116] 景云华, 董才林, 杨扬, 李笑歌. 复杂背景下的阈值插值方法. 计算机工程, 2003, 29 (17), p160~161.
- [117] J. White, G. Rohrer. Image thresholding for character image extraction and other applications equiring character image extraction. IBM Journal of Research and Development, 1983, 27 (4), p400~411.
- [118] A. Perez, R. Gonzalez. An iterative thresholding algorithm for image segmentation. IEEE Trans, 1987, p742~751.
- [119] Theo Gevers, Arnold W.m. Smeulders. Color-based object recognition. Pattern Recognition, 1999, 32(3), p453~464.
- [120] 陶霖密, 徐光祐. 机器视觉中的颜色问题及应用. 科学通报, 2001, 46 (3), 178~190.
- [121] Irene Epifanio, Guillermo Ayala. A Random Set View of Texture Classification. IEEE Trans. on image processing, 2002, 11 (6), p859~867.
- [122] Tuceryan M. and A.K.Jain. Texture segmentation using Voronoi polygons. IEEE Trans. PAMI, 1990, 12 (2), p211~216.
- [123] R. M. Haralick. Statistical and structural approaches to texture. Proceedings IEEE, 1979, 67 (5), 786~804.
- [124] Tamura H, et al. Textural features corresponding to visual perception. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1978, 8 (6), p460~473.
- [125] Laws K. Texture image segmentation. Technical report Dept of Elec Eng Image Processding Institute, Univ of Southern Califonia, 1980.
- [126] 吴彰良, 胡鹏浩, 卢荣胜, 宫能刚等, 一种双目视觉传感器结构参数设计方法, 2005 年第 24 卷第 3 期 传感器技术.
- [127] 马颂德, 张正友, 计算机视觉—计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社,

- 1998, 74—75。
- [128] 纽约摄影学院摄影教材. 中国摄影出版社, 2001.
- [129] 樊强, 姜涛, 习俊通, 马登哲. 光学三维测量中结构光栅投影系统的开发. 光电工程, 2005, 32 (10), p66~69.
- [130] <http://www.3dcamera.com/>
- [131] 吕伟涛, 陶善昌. 摄像系统光学特性的一种标定方法. 光学技术, 2001, 27 (2), p109~112.
- [132] Abdel, Karara. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proc. Symposium on Close — Range Photogrammetry, 1971, p1~18.
- [133] J. HEIKKILA, O. SILVEN. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. Proceedings of CVPR, 1997, p1106~1112.
- [134] I. W. FAIG. Calibration of close-range photogrammetry systems. Mathematical formulation, Photogrammetric Eng. Remote Sensing, 1975, 41(12), p1479~1486.
- [135] 杨述平. 基于计算机视觉的三维测试技术研究. 中北大学博士学位论文, 2005.
- [136] 李庆扬. 等数字分析. 华中理工大学出版社, 1986.
- [137] Richard Hartley, Andrew Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision. 中译本, 计算机视觉中的多视图几何, 韦穗等译安徽大学出版社, 2002,8.
- [138] 钟慧湘. 基本矩阵计算方法的研究. 吉林大学博士学位论文, 2005.
- [139] Zhang H, Sara R. A linear method for trinocular rectification. Research Report CTU-CMP-2002-09, Center for Machine Perception, Czech Technical University, 2002.
- [140] S. Suzuki, K. Abe. Topological Structural Analysis of Digital Binary Images by Border Following. CVGIP, v.30, n.1. 1985, pp. 32-46.
- [141] Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher Robert B. Direct least square fitting of ellipses [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476~480.
- [142] J. Kapur, P. Sahoo, A. Wong. A new method for gray-level picture thresholding

- p>using the entropy of the histogram. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 29, p274~285.
- [143] W. Tsai. Moment-preserving thresholding: a new approach. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985, 29, p377~393.
- [144] B.K.P.Horn. shape from shading: a method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. Ph.D. dissertation, MIT, Cambridge, 1970.
- [145] 肖轶军, 丁明跃. 基于B样条的空间自由曲线三维重建. 自动化学报, 2000, 26 (4), p572~576.
- [146] A. G. Bor, L. Kechagias, I. Pitas. Binary morphological shape-based interpolation applied to 3-D tooth reconstruction. IEEE Trans Med Imaging, 2002, 21 (2), p100~108.
- [147] 李文新, 夏胜雄, 张大鹏, 许卓群. 基于主线特征的双向匹配的掌纹识别新方法. 计算机研究与发展, 2004, 41 (6), p996~1002.
- [148] 王岩松, 阮秋琦. 基于最小二乘互相关算法的图像定位匹配研究. 通信学报, 2003, 24 (9), p80~86.
- [149] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8, p179~187.
- [150] 朱延娟, 周来水, 张丽艳, 刘爽. 基于 Hausdorff 距离的多尺度轮廓匹配算法. 中国机械工程, 2004, 15 (17), p1153~1561.
- [151] Sun Junding, Wu Xiaosheng, Zhou Lihua. Entropy-based Image Retrieval. Journal of Xidian University, 2004, 31(2), p223~228.
- [152] 李峰, 周源华. 采用金字塔分解的最小二乘影像匹配算法. 上海交通大学学报, 1999, 33 (5 ), p513~519.
- [153] 李峰, 周源华. 变形系数相关的最小二乘匹配算法. 上海交通大学学报, 1999, 33 (1 ), p1391~1394.
- [154] Yuen S Y, Ma C H. Genetic Algorithm with Competitive Image Labeling and Least Square. Pattern Recognition, 2000, 33 (12), p1949~1966.
- [155] 熊兴华, 陈鹰, 钱曾波. 一种快速、高精度和稳健的影像匹配算法. 测绘学报, 2005, 34 (1), p40~45.
- [156] Rimón Elias. Wide baseline matching through homographic transformation.

- 17th ICPR 2004, p130~133.
- [157] Xiaoye Lu, Roberto Manduchi. Wide baseline feature matching using the cross-epipolar ordering constraint. CVPR, 2004, p16~23.
- [158] Herbert Bay, Vittorio Ferrari and Luc Van Gool. Wide-baseline Stereo Matching with Line Segments. CVPR, 2005, p329~336.
- [159] Dmitry Chetverikov et al. Finding region correspondences for wide baseline stereo. ICPR, 2004, p23~26.
- [160] Philip Pritchett, Andrew Zisserman. Wide baseline stereo matching.
- [161] 王宇宙, 汪国平. 基于局部仿射不变特征的宽基线影像匹配. 计算机应用, 2006, 26 (5), p1001~1003.
- [162] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构. 清华大学出版社, 1997.
- [163] J. Van Bogart, M.S. Motion Analysis Technologies. A new Millennium in Clinical Care and Motion Analysis Technology, 2000, 6, p166~172.
- [164] 陈柘, 赵荣椿. 几何不变性及其在 3D 物体识别中的应用. 中国图象图形学报, 2003, 8 (9), p993~1000.
- [165] 黄文虎, 邵成勋. 多柔体系统动力学. 科学出版社, 1996.
- [166] Yuichi Motai, Akio Kosaka. SmartView: Hand-Eye Robotic Calibration for Active Viewpoint Generation and Object Grasping. ICRA 2001, p2183~2190.
- [167] Zhuang H Q. Hand/eye calibration for electronic assembly robots. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1998, 14 (4)p612~616.
- [168] Shiu Y C and Ahmad S. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$ . IEEE Trans. of Robotics and Automation, 1989, 5 (1), p16~27.
- [169] 周江华, 苗育红, 王明海. 姿态运动的 Rodrigues 参数描述. 宇航学报, 2004, 25 (5), p514~519.
- [170] tamas varady, Ralph R Martin and Jordan Coxt. Reverse engineering of geometric models: An introduction. Computer-Aided Design, 1997, 29 (4), P255~268 .
- [171] Woo H, Wang S. A new segmentation method for point cloud data. Inter. Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42 (3), P167~178.



- [172] BENKO P, MARTIN R R, VARADY T. Algorithms for reverse engineering boundary representation models. *Computer-Aided Design*, 2001, 33 (11), P839~851.
- [173] 柯映林, 刘云峰, 范树迁, 陈曦, 李岸. 基于特征的反求工程建模系统 RE-SOFT. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16 (6), p799~811.
- [174] Arkadiusz Sitek, Member, et al. Tomographic Reconstruction Using an Adaptive Tetrahedral Mesh Defined by a Point Cloud. *IEEE Trans. on medical imaging*, 2006, 25 (9), p1172~1180.
- [175] 张广军. 机器视觉. 科学出版社, 2005.6.



## 攻读博士学位期间论文、专利及科研情况

### 论文:

欧阳祥波, 宗志坚, 熊会元. NURBS 曲线在航标灯设计中的应用, 照明工程学报, 2004, 3: 34~36.

欧阳祥波, 宗志坚, 熊会元. 线结构光中心线的精确提取, 中山大学学报, 已录用。

欧阳祥波, 宗志坚, 熊会元. 基于标志点的测量数据自动拼接方法, 中国图象图形学报, 已录用。

李志扬, 欧阳祥波, 黄明宇. ABS 汽车前照灯多曲面反射器的研制, 工程塑料应用, 2005, 1: 45~47.

### 专利:

发明专利: 一种三维重构的立体摄像机标定方法 (已受理, 专利受理号: 200710031249.9), 申请人: 中山大学, 发明人: 欧阳祥波, 宗志坚, 熊会元。

### 科研:

桌面复合型三维数字化输入系统及设备, 项目来源: 广东省科技厅。

基于主随动机械臂平台的混合三坐标测量系统, 项目来源: 广州市科学技术局。

粤澳电动汽车示范及其产业化, 项目来源: 广东省科技厅。



## 致谢

感谢导师宗志坚教授！他对论文的选题、研究的进度、论文的审阅都倾注了大量的心血。几年来，宗教授严以督促，悉心指导和孜孜教诲，使学生在科研、学业等方面都得到了长足进步。宗教授深厚的理论功底，敏锐的学术洞察力，宽宏谦和的为人以及对科研的敬业精神，对学生的成长帮助极大，也是我以后立身治学的行为准则。宗教授在生活上、工作上同样给予我关心、鼓励和支持，在此特向宗教授表示衷心的感谢。

感谢余志教授，在交通中心的那段时间我受益匪浅。余教授的各方面的才能和成就令人高山仰止，虽不能至，然心向往之。

感谢现代设计技术中心的谭晓军老师所给予的帮助和指导，感谢熊会元老师、刘忠途老师、程源所给予的帮助，在与他们的讨论中受益匪浅。感谢交通中心李军老师的帮助，感谢李熙莹老师在图像处理方面所给予的指导。

感谢高群博士，和他一起做论文时的探讨，给了我很多有益的启发；在完成学业的几年里，朝夕相处的日子给了我很多美好的记忆。感谢龙舟、左艳蕊和其他同学所给予的帮助和支持。感谢艾迪公司林海峰在各种 CAD 应用方面所给予的帮助，感谢中心工作人员陈炼的支持。

感谢工学院凌春贤书记、王翠林老师、谭海燕老师所给予的关注和帮助。

感谢父母和兄长多年来的支持与鼓励；感谢岳父、岳母对我学习上的支持和生活上的关怀；感谢妻子常建杰女士，她的付出和支持使我能够完成学业。



## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：      年      月      日