

光栅投影三维成像及物体重建

专业：图像处理与网络通信

研究生：孙晓刚 指导教师：罗代升

摘要：在快速发展的工业社会里，三维物体的建模及测量技术占有越来越重要的地位，同时实际需求对其提出了越来越高的要求。本文提出了一种基于几何投影，计算机图形学和虚拟现实相结合的光栅投影成像三维物体重建及测量系统。该系统具有结构简单、精度高、速度快、适用面广、自动化程度高等特点。

本系统首先采用二进制编码获得图像各像素点的近似相位值，然后采用相移法获得像素点的精确相位值。由于该系统中的相位解缠是在二进制条码中进行的，取包裹相位的精确得到提高。

在光栅投影图像的处理中，作者提出了几种优化算法。因为光栅条纹图像易受到一些不确定性因素的干扰，例如来自环境、照明、镜头、扫描、量化、传输等的干扰，作者提出了一种快速背景校正算法来改善图像质量和对比度。同时，提出了一种快速中值滤波算法对图像进行滤波和增强。由于由黑白条纹组成的光栅图像相对于一般非光栅图像对比度较高，提出了一种局部自适应阈值分割算法进行二值化分割。针对图像分割过程中会出现孤立的黑白点噪声，采用了二值图像旋转滤波算法来消除这种噪声。另外，还把光栅图像点分为有效点和无效点，只对有效点进行处理，大大加快了处理的速度，提高了准确度。

在物体测量中，分析了重建和测量误差，提出了一种纠错处理算法，提高了物体的测量精度。针对定标和大目标物体成像，提出了一种有效的图像拼接算法。

在三维物体重建中，采用了三种重建方法：实体重建，投影重建，表面重建。在表面重建的基础上，提出了一种快速的虚拟现实表面重建算法。利用 OpenGL 技术，研究开发了一个虚拟现实浏览器，用于重建三维物体的三维显示和可视化。为了增强可视化的便捷性，还研究开发了一些诸如光滑，透明，阴影，光照等处理和拖动，旋转等显示功能。

关键词：光栅投影成像，三维物体测量，图像处理，图像分割，图像拼接，相位解缠，实体重建，表面重建，投影重建，虚拟现实显示

3D Imaging and Object Reconstruction from Raster Projection

Thesis submitted for the Degree of Master
in Image Processing and Network Communication

Xiaogang Sun

Supervisor: Daisheng Luo

Abstract As the fast development of modern industry society, the technologies of three-dimensional object modeling and measuring play more and more important roles. At the same time, the practical needs put forward higher and higher requirements on the technologies. In this thesis, a system for raster projection 3D imaging and 3D object reconstruction and measuring is proposed, combining the theories and techniques of geometric projection, computer graphics and virtual reality. This system has the merits of simple structures, good precision, fast speed, wide applications, high automation, etc.

In the system, a set of binary codes are used to acquire the approximate phases of points in a distortional raster projection image firstly. Then, a set of phase-shift codes are used to acquire the accurate phases of the points. Because the phase unwrapping in the system is implemented inside the binary code strips, the accuracy of phase unwrapping has been promoted.

In the raster projection image processing, the author of this thesis proposes a few optimized methods. Because the raster projection image is usually degraded by random interference from such as environment, illumination, camera lens, image scanning, quantization, transmission, etc., a method of fast background correction is proposed for improving the image quality and contrast. In addition, a fast recursive median filter and algorithm is developed for image filtering and image enhancement. Since the raster projection image consists of black and white strips and has higher

contrast than non-raster projection image, an adaptive thresholding algorithm is proposed for automatic image thresholding. Considering the segmentation would produce some isolated noisy spots, a method, named binary image rotating filter method, is adopted to remove the spots. Furthermore, the image pixels are classified into two classes: invalid pixels and valid pixels, and only the valid pixels are processed. As the result, the image processing speed and precision are promoted.

In object measuring, the possible errors in 3D object reconstruction and measuring are analyzed. A new method is proposed for error correction and the accuracy of measuring is improved. The image registration is also analyzed and an effective method of registration is presented as well for calibration and big object measuring.

In 3D object reconstruction, three methods are utilized: volume reconstruction, surface reconstruction and projection reconstruction. In surface reconstruction, a fast algorithm of VRML surface reconstruction is proposed. For 3D visualization of the reconstructed objects, a VR viewer is developed using OpenGL technology. Especially, a series of methods to enhance the display effect, such as smoothening, transparentization, shadowing, illuminating, material rendering, coloring and so on, are developed. To improve the convenience of visualization, a few functions, such as dragging, free moving, translation, etc., are developed as well.

Keywords : Raster projection imaging, 3D object measuring, Image processing, Image segmentation, Image registration, Phase unwrapping, Volume reconstruction, Surface reconstruction, Projection reconstruction, VR visualization

第 1 章 绪论

1.1 引言

三维物体形状检测和三维物体重建技术是计算机图像处理,以及计算机视觉处理以及模式识别的一个分支。在生产自动化^[1]、机器人视觉、CAD^[2]、医学^[3]等方面有着越来越多的应用前景。在工业自动化生产流水线上,经常需要对工业产品外壳进行外观形状快速检测以检测其是否符合生产精度要求,要做到这些,仅依靠人工检测是不够的,也是不精确的,这时候就需要采用三维检测技术,对产品进行准确、快速地检测。但是,目前国内有关准确、快速地获得物体形状信息且又利于实际应用的三维检测技术依然较少。本论文将介绍一种采用光栅投影以及计算机图像处理相结合来实现对物体形状进行三维检测的方法。实际检测结果表明,该方法通过运用光学特性和计算机图像学,以及计算机视觉处理技术,从被物体表面形状所调制的畸变条纹中,提取出物体形状的三维信息,能够快捷有效地实现三维物体的形状检测。与其它方法相比,该方法具有检测过程完全非接触(不需要接触被测物体)、测量精度及分辨率高、检测速度快并且装置简单的特点,是一种具有较高研究价值和发展前景的技术方法。

1.2 三维物体测量及重建技术的发展现状

三维物体测量及重建技术有很多种实现方法。本文主要讨论利用计算机图像处理技术进行三维物体测量及重建的技术。

利用计算机图像处理技术进行三维物体测量及重建的技术是近十年来蓬勃发展起来的新兴研究领域。一般从数字成像系统可以获得数字图像,按照图像的成像原理是否基于向物体发射信号一般可分为两类:一种是由物体辐射信号或物体表面反射信号生成图像,成像设备不发出信号;另一种是由成像设备发

出一束信号，通过接收从物体表面反射回来的或穿透物体的该信号生成图像。这两类基本成像原理对应的三维检测图像分析技术分别称为被动型和能动型^[5]。被动型检测方法有双目立体视觉系统和多目立体视觉系统等，能动型包括雷达时间差检测法、雷达相位测量法、莫尔技术、光栅投影法等。下面简要介绍三维检测图像分析技术中有代表性的几种方法的技术特点和发展现状。

1. 雷达时间差检测法

这种方法的原理是向物体发射光或电波或声波，经物体表面反射后再接收，通过测定光或电波或声波的传播时间来确定观测点到物体上某点的距离。这种方法的精度很大一部分取决于时间差检测的精度，由于光速以及电磁波的速度高达 3×10^8 米/秒，要检测由此引起的微小时间差，很难用现有的集成电路实现这种精度。并且，由于物体的反射特性，对反射光的强度必然有影响，对物体测量的精度必然也有影响。所以这种测量方法在测量精度上很难保证，即使可以保证，代价也比较大。

2. 雷达相位测量法

这种方法是由美国斯坦福大学提出的。这种方法的原理为：以光强为正弦波调制方式向物体发射激光束，当接收到经物体反射回来的光束时，光束相位与发射时相位之间存在相位差，从相位差可分析出光束的传播时间差。这种检测方法与时间差检测法相比具有较高的测量精度，因为它避免了精确测量时间差的难度。但是，这种方法也有一定局限性，测量相位差的精度决定了整个物体精度。

采用这种方法，相位差应控制在 2π 范围内。

3. 莫尔检测法

莫尔检测技术是通过光学系统将高密度光栅投影到物体上，通过与成像系统中相同光栅干涉生成莫尔条纹，从条纹的位置或相位变化来求得物体的形状尺寸。光栅投影轴可以与摄像机光轴平行，也可与摄像机光轴相交。用莫尔检测技术可得到较高精度的数据，因此莫尔检测技术常被用来检测曲面物体的表面形状，对被检测的形状有一定的限制。另外，莫尔干涉光纹强度分布范围大。噪声多，阈值选取有一定的困难，噪声抑制要求高。

4. 双目测量法

这种方法的原理是：人用双目看物体时可得到物体信息，同理若从两个不同

的位置观测同一物体，则可测出其三维位置，这种技术即所谓“双目立体视觉”，它是获得三维信息的另一个重要方法，其优点之一是不需要特殊的装置。双目立体视觉通过某景物上同一个点对应的左、右眼图像中像点（常称为匹配点）的视差来求得三维数据，所谓视差就是物体表面上同一个点在左、右眼图像中成像点的位置差异。如果知道左右位置点 X, X' ，那么它们的位置差 $(X'-X)$ 可以很容易确定。因此问题的关键在于左、右眼图像中对应点的匹配。一旦匹配，这些点的三维位置很容易从这两幅图像的对应点计算出来。用立体视觉匹配，特别是特征点匹配，只能得到物体表面某些位置上的点与摄像机光学中心之间的距离，为了得到比较稠密的表面点的距离数据，需要用内插方法。多目立体视觉成像的几何原理与双目立体视觉类似，应用多眼立体视觉不仅可求得被遮挡点图像的视差，而且可以修正双眼立体视觉的误差，提高三维数据的精度。但是，检测系统的构建成本及算法的复杂性相应增加。

5. 光栅投影法

光学三维测量中，光栅投影技术是最常用的、最有发展前途的技术。光栅投射技术借助图像数字化设备将投射条纹输入计算机，并对该载波信号进行直接的解调计算，从而求取物体表面信息。图 1.1 所示装置由 Takeda^[4] 提出，是光栅投射技术常用的典型装置。

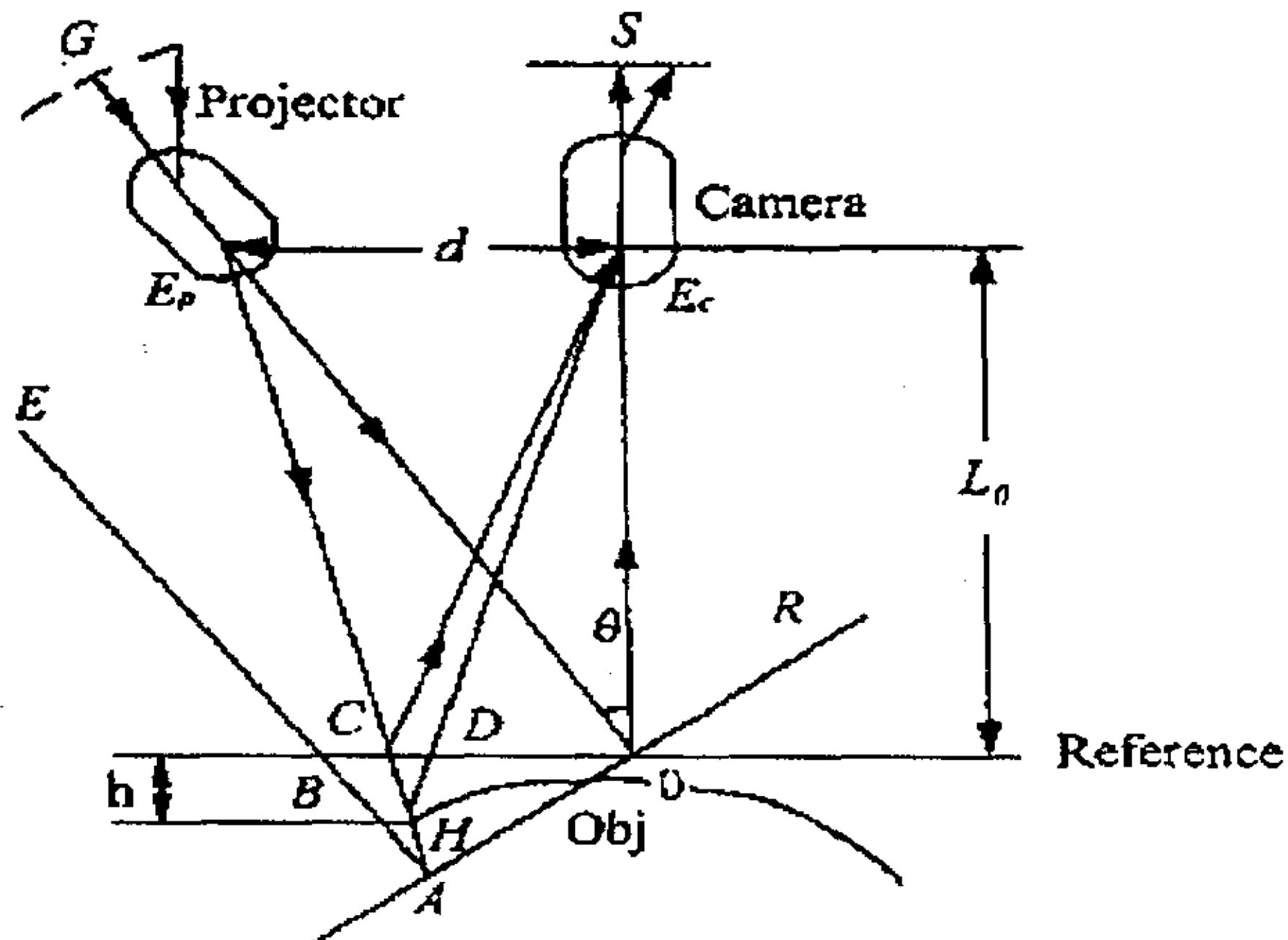


图1.1 光栅投影技术一般装置图

(本图引用文献[5])

图 1-1所示系统中, E_p 为光栅投影系统的出瞳中心, E_c 是摄像机的入瞳中心。摄像机光轴与参考面reference垂直相交于点0。该系统中, 摄像机所获取的光栅投射于待测物面或参考面上的条纹图像可表示为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (1-1)$$

其中:

I 为记录到的光强分布, a 表示背景光强, b 表示调制度, f_0 是投影到参考平面的光栅图样空间频率, 条纹位相 φ 对应于物体上各点的高度 $h(x, y)$ 。

光栅投射技术测量三维面形的过程可分为两步:

- (1) 由条纹图像求解其位相分布。
- (2) 根据位相与物面深度的映射关系求解物面的深度分布。

为了求解条纹位相, 有傅立叶变换法与位相法。

a. 傅立叶变换法

Takeda^[5]等提出了傅立叶变换与频域滤波的方法。

式 (1-1) 可以重写为:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)\exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y)\exp(-2\pi i f_0 x) \quad (1-2)$$

$$c(x, y) = 1/2b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)] \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 $g(x, y)$ 对 x 的傅立叶变换为:

$$G(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f - f_0, y) \quad (1-4)$$

由于 $a(x, y)$, $b(x, y)$ 和 $\varphi(x, y)$ 相对 f_0 变化缓慢, 因此可滤出频谱中的 $C(f - f_0, y)$ 成分, 并将其移回原点做反变换得到 $c(x, y)$, 求出 $\varphi(x, y)$:

$$\tan \varphi(x, y) = \text{Re}[c(x, y)] / \text{Im}[c(x, y)] \quad (1-5)$$

傅立叶变换法只需一幅图像, 数据处理较简单, 但是使用FFT会产生泄露、混淆和栅栏效应引起的误差。

b. 位相法

Srinivasan^[6]等最早将相移技术应用于光栅投影技术即位相法。控制光栅沿栅线垂直方向以 $2\pi/N$ 为步距作 N 步相移, 可获取 N 帧相移条纹图形, 记为 I

n ,其中 , $k=0, 1, \dots, N-1$ ($N \geq 3$)。则位相为:

$$\varphi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^N \bar{I}_i(x, y) \sin \frac{k\pi}{N}}{\sum_{i=1}^N \bar{I}_i(x, y) \cos \frac{k\pi}{N}} \quad (1-6)$$

由上式计算的位相 $\varphi(x, y)$,被截断在反三角函数的主值范围内,因而是连续的。为了计算物体的三维分布,必须首先将截断的位相恢复成连续的位相分布,这一过程称为位相解截断或位相展开。然后根据系统结构的几何关系,从展开后的位相重建三维面形。位相法测量精度高,但是必须保证位相去包裹操作准确。而往往实际上在光栅节距很小的情况下,去包裹操作变得异常困难。

1.3 光栅投影三维测量及重建研究的意义和课题任务

由于光栅投影法具有检测过程完全非接触、数据空间分辨率高、一次性瞬间投影直接实现三维空间物体形状检测和获取三维信息的特点,且成本低,便于实际应用,从而具有较高研究价值和发展前景,因此本课题把光栅投影三维成像及物体重建作为研究方向。希望通过本课题的研究,寻找出一种利用光栅投影成像和计算机图像处理技术,能够实现对三维物体空间形状进行快速检测和重建的算法,并在此基础上对三维物体的显示技术进行探讨,为构建整个快速实用的三维物体形体测量系统提供理论与实践依据。

本论文将主要讨论光栅投影法中的相位测量法及其实现,由于相位测量法的难度在于如何取包裹相位,本文提出了一种利用二进制编码与位相编码相结合的方法使去包裹相位在较小的区域内进行,解决了精确取相位包裹难的问题。在此基础上,我们将研究如何对光栅条纹图像进行预处理,如何对其编码,解码以及提出一系列算法来纠正误码。最后,我们还将探讨如何对其重建和重建后的显示问题。

本课题的研究在理论和实际应用中都有着十分重要的意义。在理论上,采用位相编码与其他编码技术相结合,能产生新的高精度的测量技术。在实际应用中,由于计算机图像处理技术的日臻成熟,从而为三维形状检测与计算机图像处理紧密结合,大大加快数据采集处理速度、实现快捷三维检测提供了技术途

径,因此本课题研究结果可直接用与生产自动化、机器人视觉、CAD、医学等应用领域,在自动控制研究领域也是必不可少的一个方面。本课题的研究成果,将为国内致力于发展此领域自动测量技术的研究人员以及工程人员,构建快速实用的高精度实时测量系统提供理论与实践的支撑。

本课题涉及到的领域有光学、空间几何学、图像获取、处理、计算机辅助分析,虚拟现实等技术。主要应用领域有三维数据获取、虚拟现实、机器视觉、实物仿真、工业检测、逆向工程、动态和瞬变过程研究、影视特技、三维动画等。

本课题是四川大学图像信息研究所与中国科学院光电技术研究所的合作项目。

第 2 章 光栅投影三维成像及系统

这一章我们首先讨论光栅投影成像的基本原理以及如何利用投影几何原理得到投影图像在二维坐标系与三维坐标系的位置的对应关系^[7]，然后讨论光栅投影三维图像重建的基本原理，最后构建我们的光栅投影三维成像及测量系统。

2.1 光栅投影成像的基本原理

把由光栅 P 产生的一束很细的光投影到空间的三维物体上，如图 2.1 所示，在物体表面上形成一道光线。这道光线好比是一个光平面切割三维物体后形成的三维物体切面的边沿。这个边沿相当于三维物体在光切面处的表面点的集合。如果光栅是一个单缝光栅，如图 2.1 所示，在与光栅投影光平面垂直的方向(X 轴)匀速平移光栅 (P1-Pn) 或物体，就可在物体表面形成移动的光切口。这些移动的光切口的集合，构成了三维物体的表面图像。当光栅是一个多缝光栅(P1-Pn) 时，如图 2.2 所示，多缝光栅的一组平行光线投影到三维物体上，在三维物体表面上形成一组平行光切口。这组平行光切口相当于三维物体的一个表面带。当这组投影光覆盖整个物体时，这些光切口就相当于这个物体的整个表面。于是，这些光切口的集合就构成了三维物体表面图像。

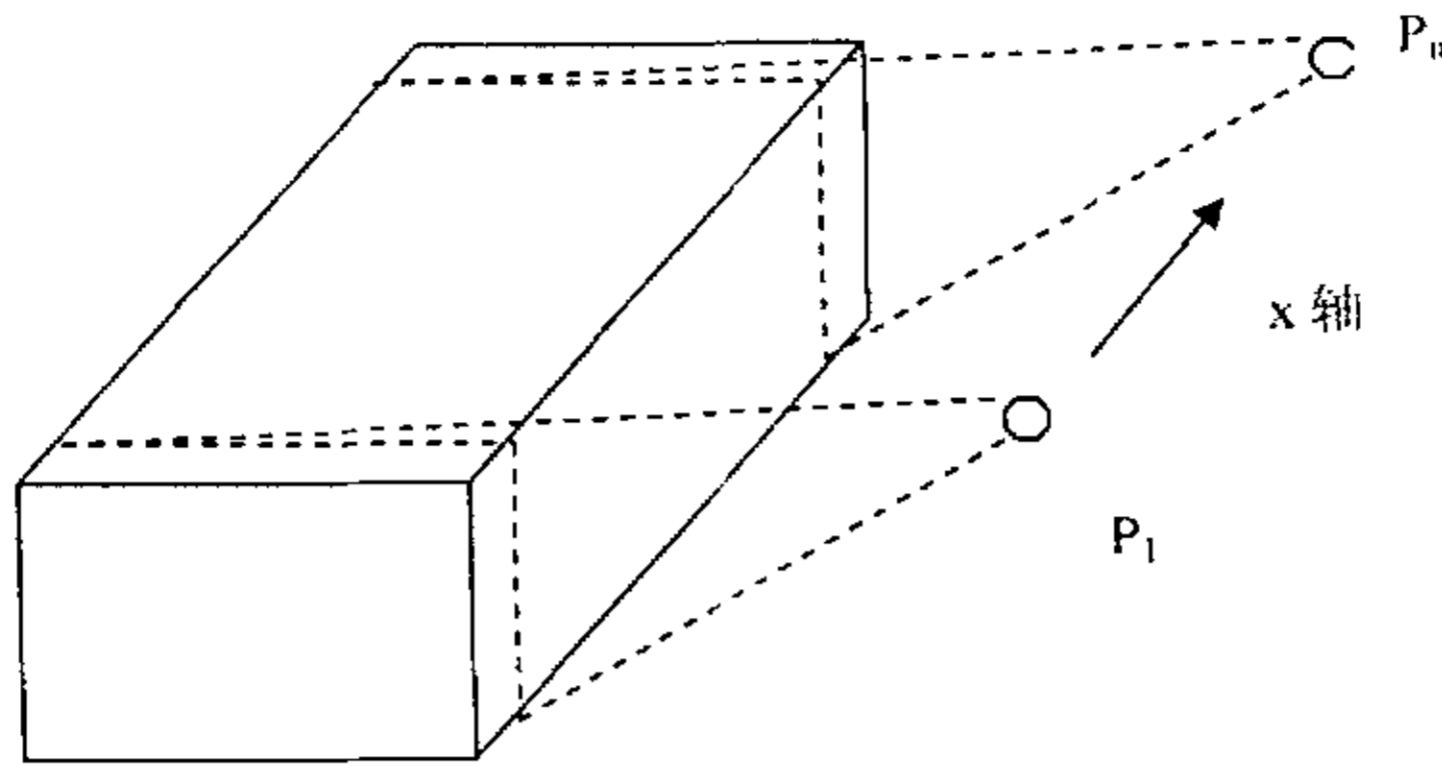


图 2.1 光栅投影示意

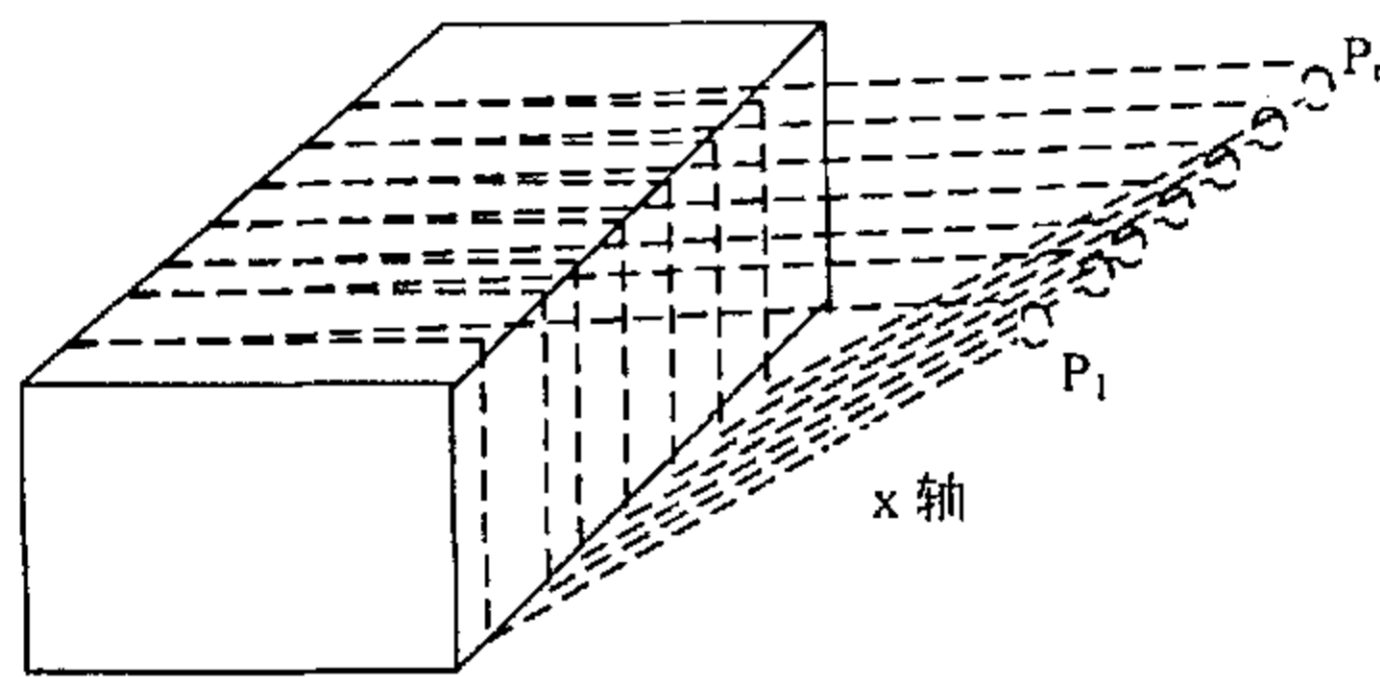


图 2.2 多缝光栅投影示意

设物体放置在水平面上，如图 2.3 所示。又设物体所在的三维世界坐标系的 x - y 平面在放置物体的水平面上； x 坐标轴与投影光栅的移动方向平行同向； y 坐标轴与光栅的投影方向平行同向； z 坐标轴垂直向上，与 x , y 坐标轴构成右手坐标系。于是，物体表面上的任何一点在三维世界坐标系里的位置为 $p(x, y, z)$ 。

设摄像机离世界坐标系的 x - y 平面的垂直高度，离世界坐标系的原点的距

离, 以及摄像机的二维窗口平面 $i-j$ 离摄像机的距离, 离 $x-y$ 平面的高度均可调, 以使三维场景充满整个二维窗口视场。摄像机的俯角设为 45° , 以使三维世界坐标系中的水平垂直长度和其在二维视窗中的垂直投影长度相同。摄像机的二维窗口平面 $i-j$ 与世界坐标系的 $x-y$ 平面垂直, i 坐标轴与 x 坐标轴的夹角为 α , j 坐标轴与 z 坐标轴平行同向。于是, 物体表面上的任何一点 $p(x,y,z)$ 在二维窗口坐标系里的位置为 $p(i,j)$ 。

由于摄像机离物体比较近, 投影的消逝点可以看成是在无穷远。因而, 从三维世界坐标系到二维视窗坐标系的投影可以看成是平行投影。那么, 在三维世界坐标系里的三维物体表面上的任何一点 $p(x,y,z)$ 投影在二维窗口坐标系里的点 $p(i,j)$ 的坐标 i,j , 可以由空间几何的投影理论确定。

在二维窗口坐标系 (i,j) 中, 三维世界坐标系 x 轴的投影 i_x, j_x 分别为:

$$i_x = x \cos \alpha + i_0 \quad (2-1)$$

$$j_x = x \sin \alpha + j_0 \quad (2-2)$$

三维世界坐标系 y 轴的投影 i_y, j_y 为:

$$i_y = -y \cos \beta + i_0 \quad (2-3)$$

$$j_y = y \sin \beta + j_0 \quad (2-4)$$

三维世界坐标系 z 轴的投影 i_z, j_z 为:

$$i_z = i_0 \quad (2-5)$$

$$j_z = z + j_0 \quad (2-6)$$

三维世界坐标系中任意一点 (x, y, z) 的投影 i, j 为:

$$i = x \cos \alpha - y \cos \beta + i_0 \quad (2-7)$$

$$j = x \sin \alpha + y \sin \beta + j_0 + z \quad (2-8)$$

其中, (i_0, j_0) 表示世界坐标系的坐标原点在二维视窗坐标系中的投影, α 表示 x 轴在 $i-j$ 平面上的投影与 i 轴所成的角度, $\beta = 90^\circ - \alpha$ 。

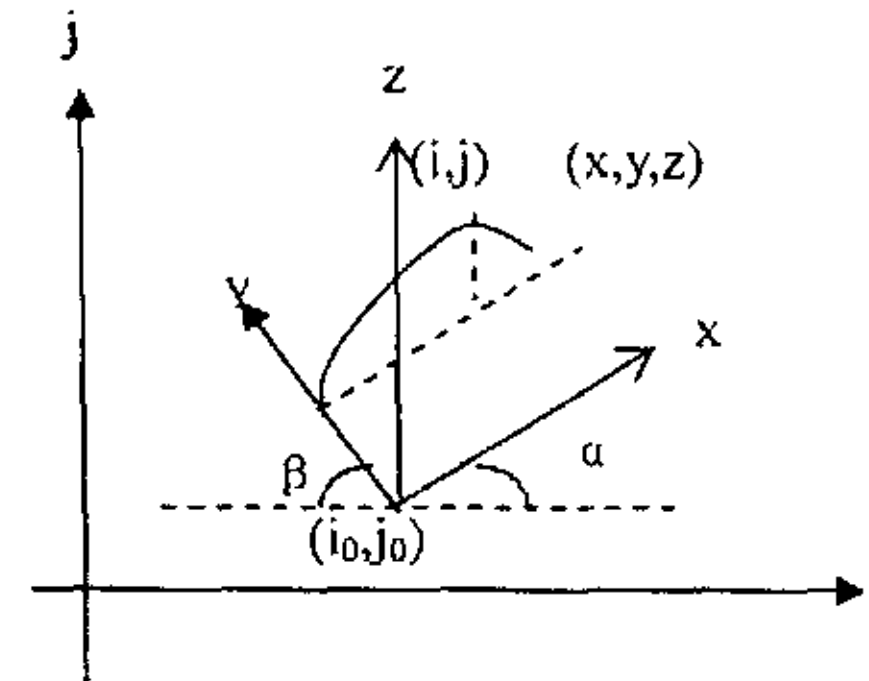


图 2.3 二维到三维对应的示意图

2.2 光栅投影三维图像重建的基本原理

由光栅投影成像生成的二维图像含有 n 条切面轮廓线。由这 n 条切面轮廓线,

利用投影几何学原理，可以重建出三维目标。

由图 2.1、图 2.2 和图 2.3 所示的从三维空间到二维视图的投影过程，可以由二维坐标系反演出三维坐标系，其变换式如下：

在二维窗口坐标系中第 y 条轮廓线上的任意一点 (i, j) ，在三维世界坐标系中的 x 为：

$$x = (i + y/\cos \beta - i_0)/\cos \alpha \quad (2-9)$$

在三维世界坐标系中的 z 为：

$$z = j - x \sin \alpha - y \sin \beta - j_0 \quad (2-10)$$

于是，由二维窗口坐标系中所有轮廓线上的点 (i, j) ，就可以重建在三维世界坐标系中所对应的表面点 (x, y, z) 。这里必须注意，在三维世界坐标系中每一条轮廓线的 y 值是已知的。在二维窗口坐标系中每一条轮廓线的 y 值是用图像处理的方法检测出来的。两个坐标系轴之间的夹角 α 和 β 是事先做了定标的，但也可以用图像处理的方法检测出来。

2.3 光栅投影成像系统的硬件构成

光栅投影成像系统的物理构成非常简单，包括光栅投影仪，摄像机，转动平台，计算机，当然还有被测物体。如图 2.4，2.5 所示。光栅投影仪用来产生平行光栅，投射到转动平台里的被测样本上，由摄像机拍摄到不同角度的光栅图像，再把摄像机采集的光栅图像导入到计算机上进行处理与分析。

实际实验时我们取：

- (1) 编码条纹对数（明暗条纹各一条算一对）分别为 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 的灰度条纹图像各一张。
- (2) 相移条纹对数为 64 的 8 幅灰度条纹图像，各图像间相移角为 $\pi/4$ 。

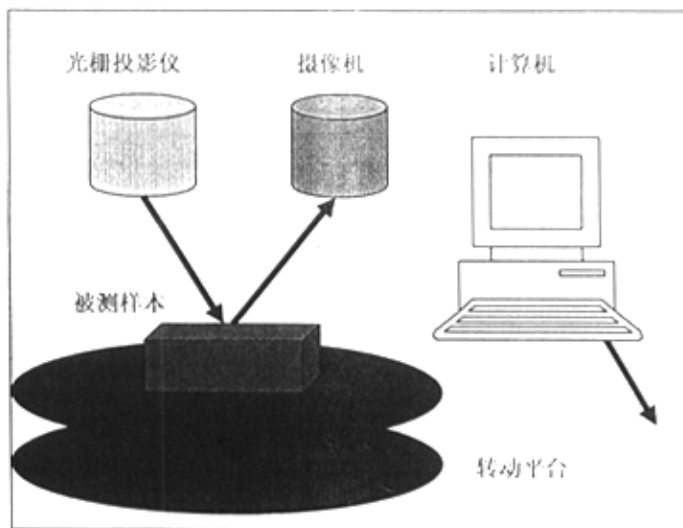


图 2.4 光栅投影成像系统硬件构成

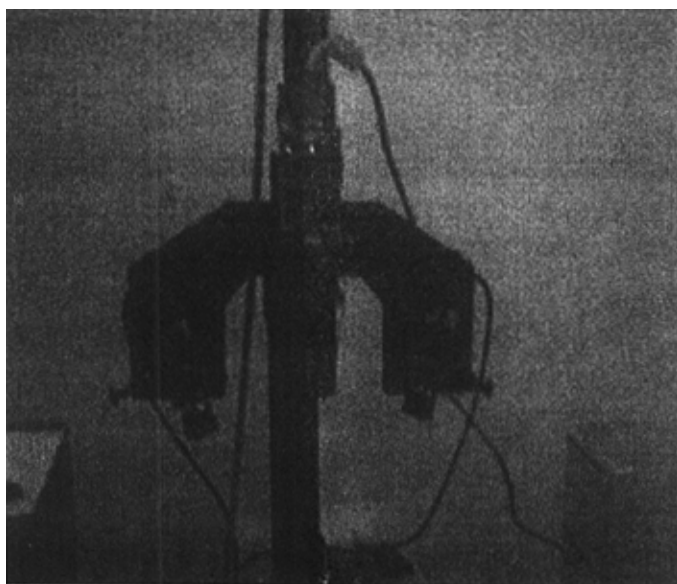


图 2.5 光栅投影成像系统硬件实物图

2.4 光栅投影成像重建系统的软件构成

光栅投影成像重建系统的软件构成主要包括以下几个模块：预处理模块，匹配模块，编码模块，纠错模块，解码模块，重建模块，显示模块。

下面具体说明：

1. 预处理模块

预处理模块主要是对采集到的光栅图像进行预处理。摄像机拍摄的图像可能受光线强弱明暗，表面反射，图像采样噪声的影响，可能使后续处理增加难度，因此必须采取适当的方法对其进行预处理。

2. 匹配模块

匹配模块主要对经过预处理的图像进行分割，把经过三维物体调制过的条纹图像与背景分割开来。这一步相当重要，只有被调制的条纹图像中的条纹边缘在分割时能保持得很好，以后步骤的编码才不会有太多误码，才能使被测物体的精度得到保证。

3. 编码模块

编码模块主要对经过匹配模块分割后的条纹序列图进行编码，由每个点在条纹二值化图像中的灰度值可求得每个点的编码值，再进行编码转换求出每点在图像中的实际条纹周期。

4. 纠错模块

纠错模块主要对经过编码模块后得到的编码条纹周期图进行纠错，降低和纠正在预处理模块和匹配模块处理过程中没有消除的对编码产生错误的因素的影响。

5. 解码模块

解码模块主要是根据编码条纹周期图中的图像点的编码值和图像点

的包裹相位值进行点加运算求出每个图像点的完全相位值,解出三维点高度。

6. 重建模块

把由解码模块得到的每个图像点的位置坐标 (x, y) 和这一点的三位高度 Z , 可得到每个点在三维坐标中的位置坐标 (x, y, z) , 把这些三维点进行虚拟现实表面重建, 即可得到被测物体的三维表面(轮廓)信息。

7. 显示模块

显示模块是把重建模块产生的虚拟现实文件经过处理(光滑等)由 OpenGL 显示出来。OpenGL 对其进行光照, 消隐, 材质等一系列命令, 可使三维物体显示具有很好的视觉效果。

以上处理步骤可如 2.6 图所示:

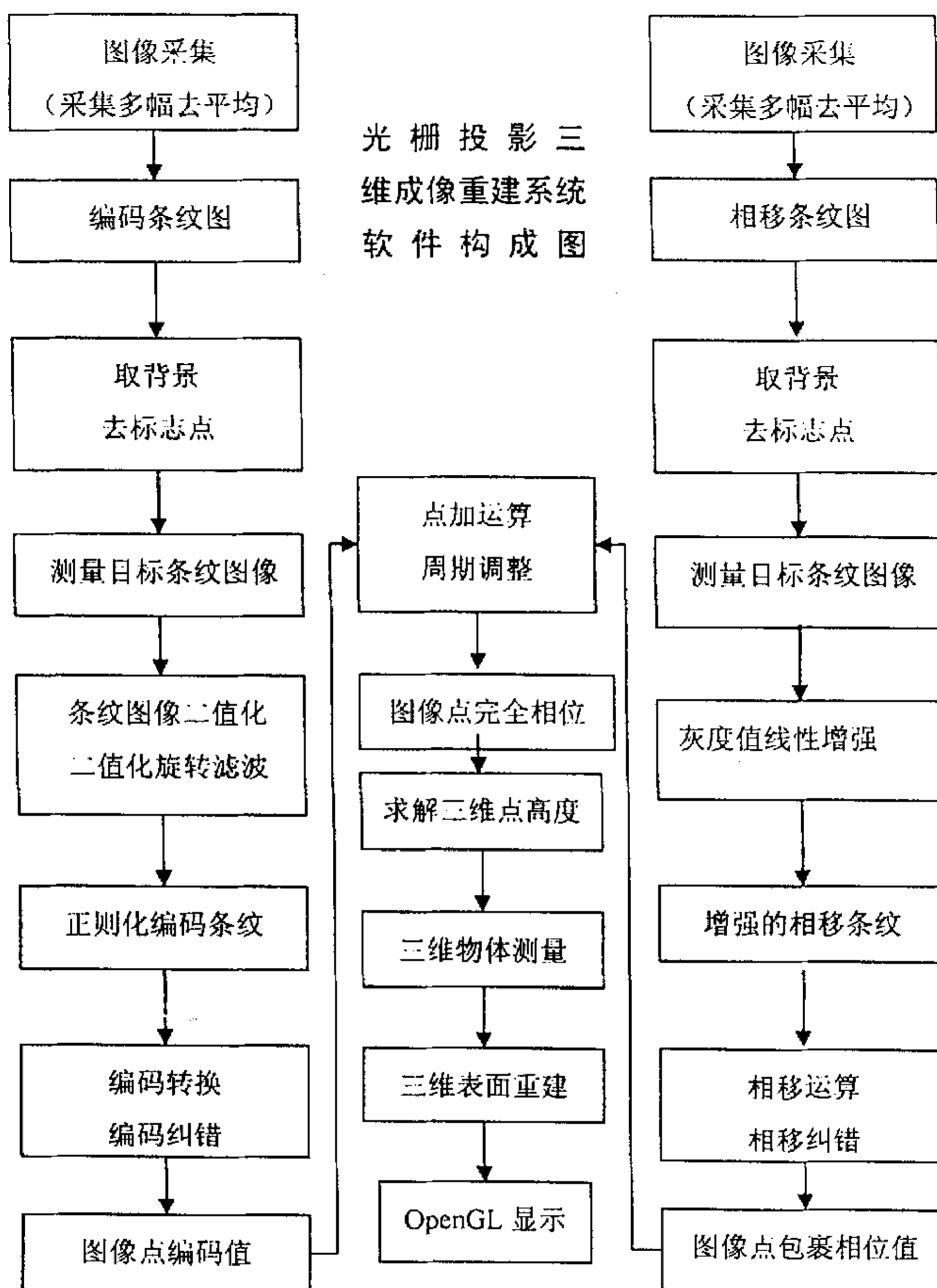


图 2.6 光栅投影成像重建系统软件构成

2.5 小结

本章主要从光学投影原理与计算机图像学理论相结合的角度介绍了光栅投

影三维成像重建的原理，并从物理硬件与系统软件方面分别介绍了光栅投影成像重建系统的构成。

第3章 光栅投影图像的处理与分析

3.1 引言

平行（或竖直）光栅投影到三维物体上，经物体表面调制后形成的光栅图像经 CCD 采集到计算机，不可避免的受到一些不确定性因素的干扰，如成像过程中的各种环境因素、图像扫描时序因素、镜头因素、传感器因素、图像的传输过程、量化过程等，总会引入一些畸变和噪声，导致图像模糊或变质、失真。这些干扰一般表现为图像中的乘性和加性噪声，如下式：

$$F_0(x, y) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_r(\alpha, \beta) H_0(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \right] E(x, y) + N(x, y) \quad (3.1)$$

其中 $F_r(x, y)$ 为理想信号， $H_0(x, y)$ 为二维滤波系统的脉冲相应函数，在光学上也就是点扩展函数。 $E(x, y)$ 为乘性噪声， $N(x, y)$ 为加性噪声。一般情况下，图像的加性噪声对图像质量影响最大^[12]。因此为了保证系统后续处理的质量和精度，必须对图像进行适当的增强和滤波。

目前通用的滤波器主要有两大类：线性滤波器和非线性滤波器。前者以其完整的理论基础、数学处理简单、易于采用硬件实现等优点，一直在图像处理领域中占有举足轻重的地位，其中比较著名的有傅氏变换滤波法、维纳滤波法。卡尔曼滤波、FIR和 IIR滤波等。但由于线性滤波器对加性噪声有较好的平滑效果，然而对脉冲型和其他一些长拖尾噪声的处理效果较差，尤其是它对阶跃信号有模糊效应，因此对本系统中的条纹状的立体图像而言，将会有较大的影响。经典的线性图像处理方法是基于对干扰和信号的概率分布作某些理想化的假定，在假定的理想模型前提下，设计对能够满足某种性能准则的滤波器为最优滤波器。当真实分布偏离理想假定分布时，处理效果就会变得很糟，甚至产生严重失真^[11]。目前的线性滤波器主要有变换域处理法和递归两种，现分述如下：

图像的二维线性变换用级数形式可以表达如下:

$$P(m_1, m_2) = \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} F(n_1, n_2)T(n_1, n_2, m_1, m_2) \quad (3.2)$$

其向量表达则为 $P = TF$, 可以证明, 采用二维线性变换间接计算法比直接用上式计算有效的多:

$$F(\omega_1, \omega_2) = \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} P(m_1, m_2)T(m_1, m_2, \omega_1, \omega_2) \quad (3.3)$$

上式中 $T(m_1, m_2, \omega_1, \omega_2)$ 为线性滤波变换核, 构造一些满足滤波要求的分离变换核, 将二维变换转换为一维变换, 在变换域中进行滤波处理, 最后再实现二维反变换, 这就是图像二维变换域处理的本质, 以二维傅立叶变换法为其典型代表。

递归滤波则是根据系统的输入和输出之间的递归关系进行的, 二维递归滤波的表达形式可表示如下:

$$R(m_1, m_2) = \sum_{j_1=1}^{J_1} \sum_{j_2=1}^{J_2} A(j_1, j_2)F(m_1 - j_1 + 1, m_2 - j_2 + 1) - \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{k_2=1}^{K_2} B(k_1, k_2)R(m_1 - j_1 + 1, m_2 - j_2 + 1) \quad (3.4)$$

式中 F 为输入, R 为输出。递归滤波器需要确定权重系数 A 和 B 从而产生输出阵列 $R(m_1, m_2)$, 并且这种类型的滤波器需要考虑收敛稳定性问题。

由于线性滤波器易使图像产生模糊等缺点, 因此二十世纪八十年代以来, 非线性滤波器也得到了广泛的研究, 尤其以中值滤波器为典型代表。中值滤波器作为一种非线性滤波器, 它能够较好的消除脉冲型噪声并保持信号边缘等细节问题。目前的中值滤波器主要有FIR混合型中值滤波、多层中值滤波、M型中值滤波和递归中值滤波等四种类型, 其中前两种在本质上是统一的。

所以我们结合了非线性和线性滤波两方面的优点, 采用了一种递归中值滤波算法对光栅图像进行滤波处理, 将滤波算法转化为一种优化处理, 兼顾了滤波处理的光滑连续性及抑制噪声的累积特性, 可有效地消除脉冲型干扰的影响, 对边缘为阶跃型的光栅图像非常实用。

进行过中值滤波后，还要对目标进行增强，然后对光栅图像进行局部自适应阈值法二值分割。条纹图二值化的过程中，难免存在由于动态门限假边缘造成的噪声或其它原因造成黑白点孤立噪声，这对后续的编码计算极为不利，因此采用二值图像的旋转滤波法来保护条纹的边缘，并消除条纹中的噪声。

此外，由于光栅采集装置易受光照的强度和均匀性的影响，因此我们下面几节将首先介绍怎样对采集到的光栅图像进行背景校正，然后分别讨论一下递归中值滤波，局部自适应阈值分割法，二值图像旋转的旋转滤波等算法。最后两节再详细讨论处理光栅图的详细步骤。

3.2 一种快速的背景校正算法

背景校正一般的步骤为：

对图像上的点(x, y)，设这点的象素值为Z，

- (1) 以其为中心取 $(2N+1)*(2N+1)$ 的模板，对其区域内的点的象素进行叠加运算后除去点的总数 $(2N+1)*(2N+1)$ 得到平均象素值 \bar{Z} 。
- (2) 然后把 $\bar{Z} - Z$ 的差值当作新的象素值存储起来（ $\bar{Z} - Z$ 的范围为： $-255 < \bar{Z} - Z < 255$ ）。
- (3) 对图像上所有点按行列进行以上的步骤后，直到最后一行的最后一点。
- (4) 最后逐点把新的象素值 $\bar{Z} - Z$ 的大小范围变换到0~255范围内，例如可以按式： $(\bar{Z} - Z + 255) / 2$ 变换。

以上方法编程实现非常简单，但实际上只要N的值取得稍微大一点，运算量相当大，速度很慢。我们提出了一种改进办法，使其运算速度大幅度提高。如图3-1所示：

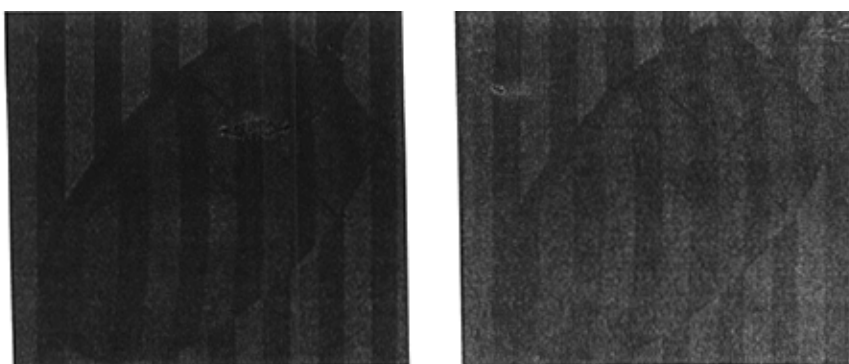
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

图3-1一种快速的背景校正算法

设图中单元格代表图像中的点，则按照上述一般背景校正方法计算标记为7点（设 $N=3$ ）需要把1,2,3,6,7,8,11,12,13加起来平均。对8点进行运算时，需要对2, 3,

7, 8, 12, 13, 4, 9, 14加起来进行平均。由图可以看出, 2, 7, 12, 8, 3, 13共六个点被重复计算, 假如计算7点时的模板像素和为 S_7 , 其中模板第一列的像素值之和为 L_1 , 模板第四列的像素值为 L_4 , 则计算8点时的模板像素之和为 $S_8 = S_7 - L_1 + L_4$ 。这样计算下一点时的模板像素之和, 完全可以只需计算模板前一列的值和后一列的值, 对于中间列的值可以由上一个点计算时得到。当 N 越大, 中间列越多, 由于中间列不需要计算, 比起一般背景校正, 速度就越快。

由于我们对条纹图进行背景校正, 因此模板半径 N 一般取为光栅条纹的间距。如果 N 取得太小, 不宜分割, 易出现“中空”现象(即条纹中心线附近分割后为背景)。下图为背景校正前后的对比图, 其中 $N=20$ 。



原图

背景校正图

图3-2 背景校正前后的对比图

3.3 递归中值滤波

中值滤波可很好地完成对脉冲噪声干扰的抑制, 但标准中值滤波器是非参数估计, 没有充分利用实际中可获得的观测模型统计知识, 存在相当的保守性和盲目性。它对长拖尾概率分布噪声(脉冲噪声)有很好的抑制能力, 但对中拖尾分布(高斯分布)和短拖尾(均匀分布)噪声抑制能力显著下降。当滤波窗内的脉冲噪声干扰样本数(对图像而言为像素数)大于窗长一半时, 中值滤波没有效果, 此时若依靠增加窗长, 固然可提高噪声滤除能力, 但是丢失图像细节。图像中

的一些细节结线、尖锐边角、经中值滤波后被消去，这对测量精度是一个严重损失。针对光栅图像关心的是图像的边缘精度，这里给出一种稳定的具有高收敛性的递归中值滤波器^{[9][10][11]}，它结合了中值滤波器和递归滤波的优点。

首先分析一维信号而后推广到二维图像^[10]，为便于理论分析，对一个离散的M级信号 $\{\alpha(n)\}$ ，取如下表示法：

$$\alpha_i(n) = \begin{cases} 1 & \text{当 } \alpha(n) \geq i \\ 0 & \text{当 } \alpha(n) < i \end{cases} \quad 1 \leq i \leq M \quad (3.5)$$

其中 $\alpha(n) = [\alpha_1(n), \alpha_2(n), \dots, \alpha_M(n)]$ ，对上述信号作递归滤波器的输出：

$$y(n) = MED[y(n-N), \dots, y(n-1), \alpha(n), \dots, \alpha(n+N)] \quad (3.6)$$

$$\text{上式相当于：} \quad y(n) = \sum_{i=1}^{M-1} y_i(n) \quad (3.7)$$

$$y_i(n) = MED[y_i(n-N), \dots, y_i(n-1), \alpha_i(n), \dots, \alpha_i(n+N)]$$

为简化标记，记： $y(n) = MED[\alpha(n-N), \dots, \alpha(n), \dots, \alpha(n+N)]$ ，中的 $\alpha(n-N), \dots, \alpha(n-1)$ 是先前的递归滤波器的输出，为便于数学分析作如下转换：

$$\{a_i(n)\} : \{0,1\} \rightarrow \{-1,1\} \Rightarrow \{b_i(n)\}, \text{ 即 } \{a_i(n)\} \xrightarrow{\frac{2a_i(n)-1}{2}} \{b_i(n)\}, \text{ 另记}$$

$V_i(n) = MED[b_i(n-N), \dots, b_i(n), \dots, b_i(n+N)]$ ，经上述处理得：

$$V_i(n) = \begin{cases} +1 & \text{当 } S(n) \geq 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad \text{其中 } S(n) = \sum_{\substack{J=N \\ J=0}}^{J=N} b_i(n+J) + b_i(n) \quad (3.8)$$

以上公式相当于使以下罚函数最小化：

$$E_i(V_i(n)) = - \sum_{\substack{j=-N \\ j \neq 0}}^{j=N} V_i(n)b_i(n+j) - V_i(n)b_i(n)$$

(3.9)

这通过如下印证:

$$E_i(+1) = -S(n) \quad E_i(-1) = S(n)$$

$$\text{当 } V_i(n) = +1, S(n) \geq 0, E_i(+1) \leq E_i(-1) \tag{3.10}$$

$$\text{当 } V_i(n) = -1, S(n) < 0, E_i(+1) > E_i(-1)$$

$E_i(\bullet)$ 为罚函数, 它的这种取最小值的特性称为优化特性, 式(3.9)的第一项控制信号的光滑连续性, 第二项控制滤波输出点和原始点的畸变性。

对一维信号而言, 经过一次递归滤波即可收敛到其根信号, 将以上算法推广到二维图像信号, 二维信号分解成两个一维的信号来处理, 二维信号的叠代处理表示如下:

$$V_{i\text{水平}}(n) = MED_{i\text{水平}}(V_i(n-N), \dots, V_i(n), \dots, V_i(n+N))$$

$$V_{i\text{垂直}}(n) = MED_{i\text{垂直}}(V_i(n-N), \dots, V_i(n), \dots, V_i(n+N)) \tag{3.11}$$

其中 $V_i(n) = b_i(n)$, 实际图像的处理窗口可选择为正方形、十字形等, 窗长一般采用 3×3 、 5×5 , 具体按图像的噪声污染情况而定, 通过将图像处理窗口的像素点按一维排序, 分成水平和垂直两个一维信号, 即可转换为一维类似的处理方法。下面我们提出了一种快速的中值滤波算法实现步骤: 设我们的处理窗口为 $N \times N$ 的正方形窗口, 窗口内的任意图像点 x 的灰度直方图为 $IMG[x]$, 窗口内点的灰度的中值为 mdn , 窗口内灰度值小于中值的点数记为 S_n 。

1. 选取图像左上方一点, 计算第一个窗口的各个点灰度直方图 $IMG[x]$, 计算出中值 mdn , 计算出窗口内灰度值小于中值的点数 S_n ;

2. 将该窗口向右移动一个像素点, 则原来最左边的一列的像素值 $gL[n]$ ($0 < n \leq N$) 的 N 个点被移出窗口, 而灰度值为 $gR[n]$ ($0 < n \leq N$) 的新窗口中最右边的一列共 N 个点则被包含在新窗口中。更新窗口的直方图 $IMG[x]$, 以及 S_n :

对移出出去的左边一列: $IMG[gL[n]] = IMG[gL[n]] - 1$ for $0 < n \leq N$

If ($gL[n] < mdn$) $S_n = S_n + 1$

对包含进来的右边一列: $IMG[gR[n]] = IMG[gR[n]] + 1$ for $0 < n \leq N$

If ($gR[n] < mdn$) $S_n = S_n + 1$

现在 $IMG[x]$ 中是新窗口的直方图, S_n 是新窗口的灰度值小于原先窗口中的中值 mdn 的点的个数。

3. 计算新窗口中的中值 mdn : 根据窗口中小于中值的像素个数 S_n 是否大于 (或小于) 窗口内的像素总个数的一半 $h = N \times N / 2$, 通过减小 (或增大) mdn 的值, 求得现在新窗口中的中值: (a) 若 $S_n > h$, 则重复: $S_n = S_n - N \times IMG[mdn]$

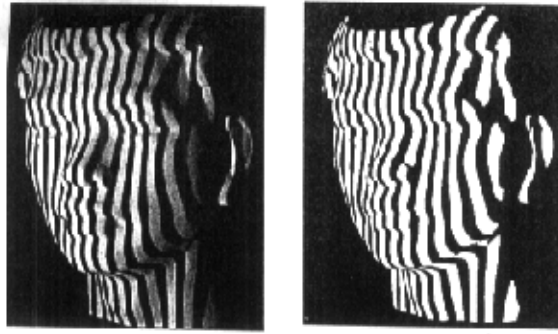
$mdn = mdn - 1$ 直到 $S_n \leq h$ (b) 若 $S_n < h$, 则重复: $S_n = S_n + N \times IMG[mdn]$

$mdn = mdn + 1$ 直到 $S_n \geq h$ 。

4. 用新的中值原图像像素点的灰度值。

5. 重复 2, 3, 4 步骤直到扫描完整幅图像。

把上述的快速中值滤波与本节讲述的递归中值滤波相结合即为快速递归中值滤波算法, 对图像进行处理能快速的消除噪声影响, 取得显著的改善效果如下图:



左：原图

右：中值递归滤波图

图 3-3 递归中值滤波前后对比图

3.4 局部自适应阈值法分割

由于采用的编码光栅黑白条纹间对比度较高。将光栅投影在被测物体表面发生变形，再经 CCD 摄像机接收后，其黑白条纹的对比度仍然是比较高的。而由于剔除了背景和特征点的像素，所以采用全局二值化的方法误差较大。针对这种情况，采用的二值化方法为局部自适应阈值法。

算法如下：

对每个有效点 (x, y) ，设其灰度值为 $I(x, y)$ ，以该点为模板中心，设其 $r \times r$ 领域内有效点的像素灰度级最大值为 I_{\max} ，最小值为 I_{\min} 。进行操作：

- (1) 如果对比度 $C(x, y) = I_{\max} - I_{\min} < l$ ，则该领域内均为黑条纹点或白条纹点，待定；
- (2) 对满足条件 (1) 的点，求领域内所有有效点的灰度级平均值 $M(x, y)$ ，若 $M(x, y) > 128$ ，则 (x, y) 及其领域内所有有效点均标记为白条纹点，赋值为 1。反之为黑条纹点，赋值为 0；

- (3) 对不满足条件(1)的点, 取阈值 $T(x, y) = (I_{\max} + I_{\min})/2$ 。若 $I(x, y) > T(x, y)$, 则当前点标记为白条纹点, 反之为黑条纹点;
- (4) 搜索下一有效点, 判断是否已标记, 未进行标记的, 执行操作(1), 否则继续搜索下一有效点。

3.5 二值图像旋转滤波算法

条纹图二值化的过程中, 难免存在由于动态门限假边缘造成的噪声或其它原因造成黑白点孤立噪声, 这对后续的编码计算极为不利, 会造成相位值展开计算的失败, 必须滤掉这些噪声。考虑到旋转滤波能够保护条纹的边缘, 并能消除条纹中的噪声, 因此采用二值图像的旋转滤波法。而被测物体的二值条纹图像由于去除背景、标志点的影响, 会产生很多区域边界和条纹间断区。为了使旋转滤波法能够适应任意区域边界, 可将双臂旋转滤波法和单臂旋转滤波法联合使用。在每一个点, 首先使用双臂旋转滤波, 只要有一条方向滤波线遇到边界点, 则改换单臂旋转滤波来进行。

算法: 对每个有效点 (x, y) , 以该点为模板中心, 取 $r \times r$ 领域进行操作:

- (1) 首先设定下图中的 8 个等分角方向滤波线, 按从 1 到 8 的顺序进行扫描。



- (2) 如果按(1)扫描的某个方向上遇到无效点, 则分解为该方向上的从模板中心开始的两个方向的扫描。找出两个方向上除模板中心以外的有效点个数较多的方向作为实际的扫描方向。

- (3) 对方向 i 扫描, 计算该方向上除模板中心以外的有效点总数 $l_i(x, y)$ 和与模板中心同值的有效点数 $n_i(x, y)$ ($i = 1, 2, \dots, 8$)。
- (4) 若 $n_i(x, y) \leq l_i(x, y)/2$, 则将当前点赋予相反值, 并返回(3)进行方向 $i+1$ 的扫描。其他情况进行下一步操作。
- (5) 若 $n_i(x, y) = l_i(x, y)$ 且 $i \neq 1$ 则当前点保持不变并返回(1)进行下一个有效点的操作。其他情况进行下一步操作。
- (6) 当前点保持不变, 并返回(3)进行方向 $i+1$ 的扫描。
- (7) 对下一个有效点重复上述(1)–(6)的操作。

一般一次二值旋转滤波不能完全滤掉所有噪声点。可重复进行多次直到滤波前后的图像没有变化为止。

3.6 编码条纹图的处理步骤

(1) 采集多幅图像平均

设原图像为 $f(x, y)$, 若图像噪声是互不相关的加性噪声, 且均值为 0, 设为 $n(x, y)$, 则下式成立

$$g(x, y) = f(x, y) + n(x, y) \tag{3.12}$$

取 M 张内容相同但含有不同噪声的图像, 将它们叠加起来, 再作平均计算后有

$$\bar{g}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g_i(x, y) \quad f(x, y) = E\{\bar{g}(x, y)\} \quad \sigma_E^2(x, y) = \frac{1}{M} \sigma_n^2(x, y) \tag{3.13}$$

式中 $E\{\}$ 代表数学期望, $\sigma_E^2(x, y)$ $\sigma_n^2(x, y)$ 是 \bar{g} 和 n 在点 (x, y) 处的方差。

上面的式子表明对 M 幅图像平均可把噪声方差减少 M 倍, 当 M 增大时, $\bar{g}(x, y)$ 将更加接近于 $f(x, y)$ 。可见利用对同一景物的多幅图像取平均能消除噪声产生的高频成分。系统所用 CCD 的扫描频率为 11.2 帧/秒, 故一般

利用 10 帧数字图像进行平均计算。

(2) 图像预处理以及提取测量目标

这一步我们将对图像进行滤波，去背景，去特征点，提取测量目标

由上步获取的条纹图，高亮度的标志点像素和较灰暗的背景像素会影响条纹图的二值化效果，造成条纹图的二值化边界模糊或不准确。采用 3.2 节介绍的背景校正提高图像对比度，采取 3.3 节介绍的递归中值滤波，通过对目标的滤波和增强等算法可以成功的获得了背景、特征点和被测量目标的分类标志链表。所以根据该链表，将只对链表中有被测物体标志的条纹图像素进行处理，这样极大的简化了条纹图的数据处理量。

以下的操作均针对被测物体包含的像素，称其为有效点。其余点称为无效点。

(3) 条纹图像的二值化

采用 3.4 节介绍的局部自适应阈值法对图像进行二值化分割。

(4) 对二值图像进行旋转滤波

采用 3.5 节介绍的二值图像旋转滤波算法对二值后的图像进行滤波，来消除由于动态门限假边缘造成的噪声或其它原因造成黑白点孤立噪声。

3.7 相移条纹图的处理步骤

(1) 采集多幅图像平均

同 3.6 节步骤 (1) 的处理方法。

(2) 滤波，去背景，去特征点，提取测量目标

同 3.6 节步骤 (2) 的处理方法。

(3) 灰度值线性标定

由于背景光强等的干扰以及照明的不充分，必须标定每个像素点的实际灰度值。采用比较简单两点标定法，已经可以满足实际的需要。

算法：对每个有效点 (x, y) ，设其在相移条纹图中的灰度值为 $I(x, y)$ ，在前面的图像预处理阶段，已经获得了该有效点分别在完全照明的灰度值 $I_b(x, y)$ 和无照明情况下的灰度值 $I_d(x, y)$ ，则标定后的该点在相移条纹图中灰度值 $\bar{I}(x, y)$ 由下式给出：

$$\bar{I}(x, y) = [I(x, y) - I_d(x, y)] \frac{255}{I_b(x, y) - I_d(x, y)}$$

标定后的灰度区间取为 $[0, 255]$ ， $\bar{I}(x, y)$ 数据类型为浮点数。

3.8 小结

本章主要对手物体调制后光栅投影图像进行处理，由于经 CCD 得到的光栅图像易受到一些不确定性因素的干扰。因此，我们提出了一系列的算法对其进行滤波和增强。首先，我们提出了一种快速背景校正算法来校正因成像时光线明暗或镜头因素引起的对比度不高的情况。然后，我们采用一种中值递归滤波算法对图像进行滤波。由于有黑白条纹组成的光栅图像相对于一般图像对比度较高，我们提出了一种局部自适应阈值法分割算法对其进行二值化分割，针对分割过程中出现的黑白点孤立噪声，我们提出一种二值图像旋转滤波算法对其进行消除。另外，我们还把光栅图像点分为有效点和无效点，只对有效点进行出理，大大加快了处理的速度和准确度。最后，我们分别讲述了二值条纹图和相移图的详细处理步骤。

第 4 章 光栅投影三维测量及误差分析

这一章我们讨论光栅投影三维测量技术的一般原理，提出了我们改进的测量方法。最后讲述测量的具体实现和如何纠正测量过程中的误差。

4.1 光栅投影三维测量技术的改进方法

在光栅投影测量中，一般用相位测量法^[13]。而相位测量法集中在变频条纹的投射技术的研究^[14]，其目的是实现绝对位相的自动求解，这种技术在解决具有台阶和不连通的复杂面形的测量有很高的精度和准确性。它的精确度可达到： $1/2^n$ ，其中 2^n 为投影光栅的条数。用这种方法，如果要提高精度，必然要增加投射光栅的条数，也就是减小光栅的节距。但是随着光栅节距的减小，将使去包裹操作变得异常艰难。我们提出了一种利用二进制编码和位相编码技术相结合的方法，很好的解决了这个难题。

原理如下：

一系列空间频率逐次倍增的二值（黑白）条纹被依次投射于物体表面之上。其间，物面上任意点位于黑白条纹的状态可利用阈值方法确定，分别记为 0 与 1，逐次排列后可形成该点二进制编码。在条纹到达某一高频（条纹宽度减小到一定宽度，阈值判断困难）时，采用位相编码与相移算法来提高测量分辨率，并使位相去包裹的操作在较小的区域内进行。

如图 4-1 所示：左图为二值编码图之一，右图为它的 8 步相移条纹图之一。

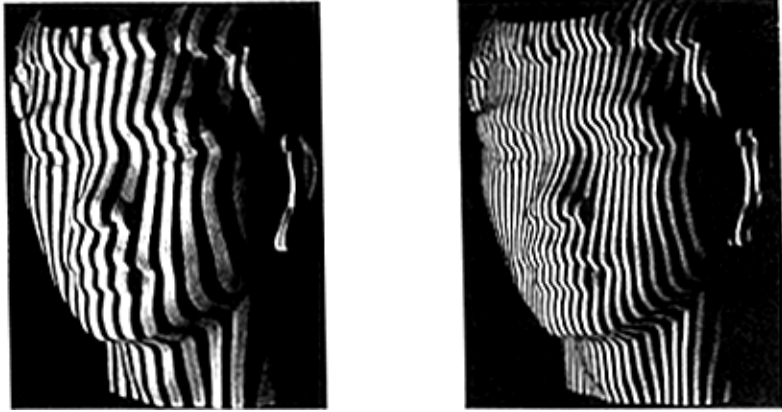


图 4-1 编码条纹与相移条纹

设物体表面任一点为 (x,y) ，这一点的灰度为 $\bar{I}_i(x,y)$ ，编码后这一点的码值为 $Z(x,y)$ ， N 步相移后相位为 $\phi(x,y)$ ，则由相移调整原理可得出：

$$\phi(x,y) = -\arctan \frac{\sum_{i=1}^N \bar{I}_i(x,y) \sin \frac{k\pi}{N}}{\sum_{i=1}^N \bar{I}_i(x,y) \cos \frac{k\pi}{N}} \quad (4.1)$$

设 N 步相移前的点位置为 (x_0,y_0) ，相移后这一点的位置为 (x_n,y_n) ，则应有下式成立：

$$\phi(x_0,y_0) - \phi(x_n,y_n) = Z(x_0,y_0) - Z(x_n,y_n) \quad (4.2)$$

由(4.1)，(4.2)可以求解出物体调制的真实相位，根据相位可测出物体的深度信息。定标后，即可得到物体面体的三维数据。

实际做法为：我们取编码范围为 $0 \sim 2^7$ ，然后对 128 根条纹进行 8 步相移。这样我们就需要 7 幅二值化的编码条纹图（空间频率逐次倍增的二值黑白条纹图）和 8 幅二值化相移条纹图。利用这 15 张图，即可取得目标物体的深度信息。首先我们由每个点在 7 幅二值化图像中的灰度值可求得每个点的编码值，再进行编码转换，求出每点在图像中的实际条纹周期。再由 8 幅相移条纹图求解每个点的包裹相位值。对图像点的编码值和图像点的包裹相位值进行点加运算和周期调整，我们即可得到图像点完全相位，求解出三维点的深（高）度信息。

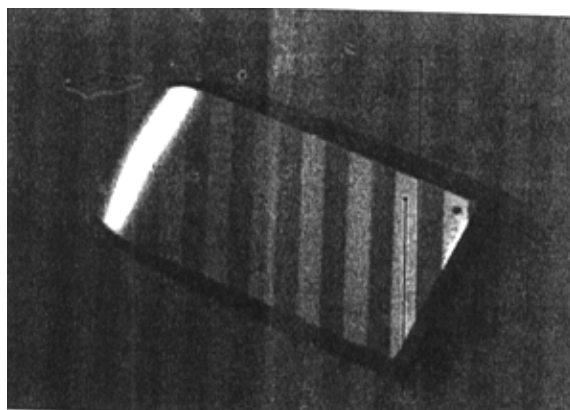


图 4-2 二进制编码条纹图编码与解码

在条纹图没有被物体调制时，对每个条纹从左向右分别定义为第 1, 2, 3, 4... 127 条纹；另一方面，由该点在 7 幅二值化图像中对应的黑白标记值，按该图像的编码条纹对数从 1 到 64 的顺序排列，得到该点的编码值为一个 7 位二进制数 $B(x, y)$ 。两者应有如图表 4-3 对应关系：其中 $Z(x, y)$ 为实际条纹周期。

$B(x, y)$	000000	000001	000011	000010	0000110	0000111	0000101	0000100	0001100	0001101	0001111	0001110	0001010
$Z(x, y)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$B(x, y)$	0001011	0001001	0001000	0011000	0011001	0011011	0011010	0011110	0011111	0011101	0011100	0010100	0010101
$Z(x, y)$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$B(x, y)$	0010111	0010110	0010010	0010011	0010001	0010000	0110000	0110001	0110011	0110010	0110110	0110111	0110101
$Z(x, y)$	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
$B(x, y)$	0110100	0111100	0111101	0111111	0111110	0111010	0111011	0111001	0111000	0101000	0101001	0101011	0101010
$Z(x, y)$	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
$B(x, y)$	0101110	0101111	0101101	0101100	0100100	0100101	0100111	0100110	0100010	0100011	0100001	0100000	1100000
$Z(x, y)$	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
$B(x, y)$	1100001	1100011	1100010	1100110	1100111	1100101	1100100	1101100	1101101	1101111	1101110	1101010	1101011
$Z(x, y)$	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
$B(x, y)$	1101001	1101000	1111000	1111001	1111011	1111010	1111110	1111111	1111101	1111100	1110100	1110101	1110111

Z(x,y)	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
B(x,y)	1110110	1110010	1110011	1110001	1110000	1010000	1010001	1010011	1010010	1010110	1010111	1010101	1010100
Z(x,y)	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
B(x,y)	1011100	1011101	1011111	1011110	1011010	1011011	1011001	1011000	1001000	1001001	1001011	1001010	1001110
Z(x,y)	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
B(x,y)	1001111	1001101	1001100	1000100	1000101	1000111	1000110	1000010	1000011	1000001	1000000		
Z(x,y)	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127		

图 4-3 编码值与条纹周期对应表

在条纹图被目标物体调制后，由每个点在 7 幅二值化图像中的灰度值可求得每个点的编码值，再进行编码转换，求出每点在图像中的实际条纹周期。

编码算法如下：

对每个有效点 (x, y) ，

- (1) 取出该点在 7 幅二值化图像中对应的黑白标记值，按该图像的编码条纹对数从 1 到 64 的顺序排列，得到该点的编码值为一个 7 位二进制数 $B(x, y)$ 。
- (2) 由 $B(x, y)$ 按下表查出该点的实际条纹周期 $Z(x, y)$ 。
- (3) 对下一个有效点重复(1)一(2)的操作。

4.3 相移图的相移运算

由上一节知道，求出条纹图在调制前后的实际条纹周期之差就可得到目标物体的深度信息。但是，得到的这个深度信息不是完全的，它的精度取决于条纹的条数（1/128）。这个精度远远达不到实际的需要，目标物体重建出来后，必然不够精细。因此我们需要对每个条纹再细分，实际中我们采用 8 步相移法：相移条纹对数为 64 的灰度条纹图像，各图像间相移角为 $\pi/4$ ，得到 8 幅相移条

纹灰度图像。

对每个有效点 (x, y) ，已进行 3.6 节的灰度值线性标定步骤，设其在 8 幅相移图像中的灰度值为 $\bar{I}_i(x, y)(i=1, 2, \dots, 8)$

则由把 $N=8$ 代入 (4.1) 式：

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= -\arctan \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{I}_i(x, y) \sin \frac{k\pi}{4}}{\sum_{i=1}^8 \bar{I}_i(x, y) \cos \frac{k\pi}{4}} \\ &= \arctan \frac{\bar{I}_1 + \bar{I}_3 - \bar{I}_5 - \bar{I}_7 + \sqrt{2}(\bar{I}_2 - \bar{I}_6)}{\bar{I}_3 + \bar{I}_5 - \bar{I}_1 - \bar{I}_7 + \sqrt{2}(\bar{I}_4 - \bar{I}_8)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

($\varphi(x, y)$ 为有效点的包裹相位值)

4.4 求解图像有效点的真实相位

利用公式 (4.3) 和 (4.2) 可推出真实相位 $\phi(x, y)$ 的值。对每个有效点 (x, y) ，其真实相位 $\phi(x, y)$ 按下面方法计算：

算法：对每个有效点 (x, y) ，设 $Z(x, y) \equiv z(x, y) \pmod{4}$

(1) 如果 $\varphi(x, y) < 0$ 且 $z(x, y) \equiv 1$ 或 3 ，

$$\text{则 } \phi(x, y) = \frac{Z(x, y)}{4} + 1 + \frac{2\varphi(x, y)}{\pi}$$

(2) 如果 $\varphi(x, y) \geq 0$ 且 $z(x, y) \equiv 0$ 或 2 ，

$$\text{则 } \phi(x, y) = \frac{Z(x, y)}{4} + \frac{2\varphi(x, y)}{\pi}$$

(3) 如果上述两种情况都不满足，则 $Z(x, y)$ 或 $\phi(x, y)$ 中存在误差，使得该点解包失败。将这一点设成无效点。

4.5 误差及分析

码转换的过程其实就是对光栅图像分割后图像点的灰度值进行转换。所以

光栅图像分割的好坏对编码转换极为重要。由上一章我们用一系列分割算法以保证光栅图像分割后尽可能接近真实光栅分布信息。实际上，没有任何一种分割方法能保证分割后的图像与真实情况完全一致，没有误差。分割的误差，必然导致编码产生误差。下面是从编码后的图像里截取的一段码值：

58	58	58	59	59	59	59	58	58	61	61	62	62	62	62	63	63
58	58	59	59	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63
58	58	58	59	59	59	59	64	64	61	61	62	62	62	62	63	63
58	58	59	59	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63
58	58	58	59	59	59	59	58	61	61	62	62	62	62	62	63	63
58	58	59	59	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63
58	59	59	59	59	61	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63	64

图 4-4 编码误差

由图中知 58 64 为误码，它有可能是分割产生的并在编码转换中延续的误码。误码的存在，将导致深度信息的误差。深度信息的误差在重建后，使物体上产生毛刺或小黑洞，因此我们必须对其进行纠正。

纠错编码的算法如下：设 $z(i, j)$ 为 (i, j) 点的码值

- (1) 对编码码值第 i 行进行扫描。如果第 j 点的码值 $z(i, j)$ 大于 $j+1$ 点的码值 $z(i, j+1)$ ，转到(2)；如果第 j 点的码值 $z(i, j)$ 小于 $j-1$ 点的码值 $z(i, j-1)$ ，转到(3)。否则，继续下一点扫描，直到 i 行的最后一个码值，转到(4)。
- (2) 从 $j+2$ 点向右扫描，直到右边点 r 的码值大于 j 点的码值，记录扫描过程中扫描的点数 m_1 ，与码值等于 $j+1$ 点码值的个数 m_2 。如果， $m_1 > T$ (T 为门限，一般取为 5)，不处理。否则，如果 $m_1 = m_2$ ，则把这 m_1 个点码值更改为：第 j 点和第 r 点的平均值加 0.5 取整；如果 $m_1 < m_2$ ，则把和 $j+1$ 点码值相同的点的码值更改为： $(m_2 * z(i, j) + z(i, r)) / (m_2 + 1) + 0.5$ ，把和 $j+1$ 点码值不同的点的码值更改为： $(z(i, j) + m_2 * z(i, r)) / (m_2 + 1) + 0.5$ 。
- (3) 从 $j-1$ 点向左扫描，直到左边点 l 的码值小于 j 点的码值，记录扫描过程中扫描的点数 m_1 ，与码值等于 j 点码值的个数 m_2 。如果， $m_1 > T$ (T 为门限，一般取为 5)，不处理。否则，如果 $m_1 = m_2$ ，则把这 m_1 个点码值更改为：第 j 点和第 l 点的平均值加 0.5 取整；如果 $m_1 < m_2$ ，则把和 j 点码值

相同的点的码值更该为: $(m2 * z(i, j+1) + z(i, l)) / (m2+1) + 0.5$,把和 j 点码值不同的点的码值更改为: $(z(i, j+1) + m2 * z(i, l)) / (m2+1) + 0.5$ 。

- (4) 使 i 加 1, 对 i+1 行进行扫描, 转到 (1);
- (5) 扫描到最后一行最后一个码值, 结束。

下图是纠错的码值表: 表中 60 和 61 为纠错后的码值。从表中看, 纠错后, 基本没有错码了。

59	58	58	59	59	59	59	60	60	61	61	62	62	62	62	63	63
58	58	59	59	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63
59	58	58	59	59	59	59	61	61	61	61	62	62	62	62	63	63
58	58	59	59	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63
59	58	58	59	59	59	59	60	61	61	62	62	62	62	62	63	63
59	58	59	59	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63
59	59	59	59	59	61	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63	64

图 4-5 纠错后的编码

图 4-6 为纠错前的码值图, 右图为纠错后的码值图。

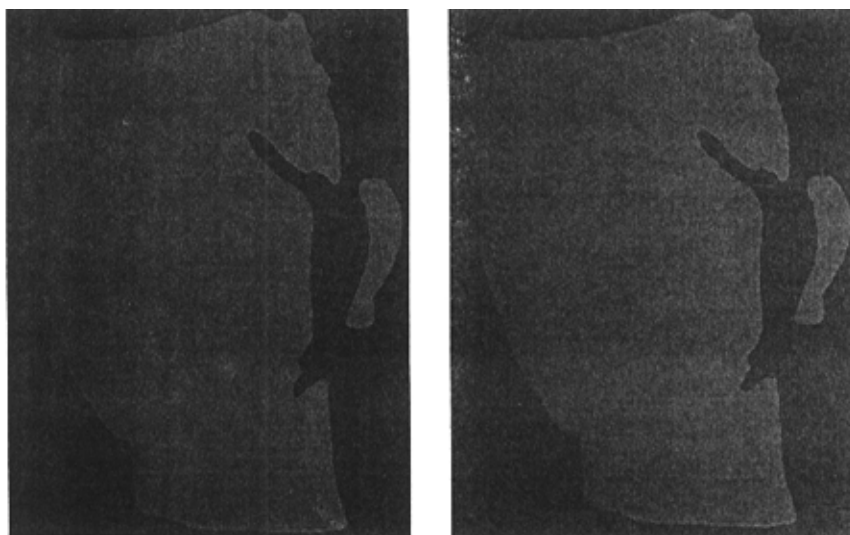


图 4-6 纠错前后的码值图

从图像上看，左图前额部分有部分误差，左眼，脖子附近也有小块误差。在右图中这些误差已经不明显了，这说明我们提出的算法很好的达到了纠错编码的目的。

4.6 系统标定与拼接

由以上几节我们可以得到物体表面点受光栅调制前后的相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ ，由光学原理和系统装置可知由物体高度轮廓 $h(x, y)$ 和光栅变形的相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 之间存在如下关系^[15]：

$$h(x, y) = \frac{l\Delta\varphi(x, y)}{\Delta\varphi(x, y) + 2\pi d / P} \quad (4.4)$$

式中， l 、 d 、 P 是系统的几何参数。其中 l 为摄像机光心到参考面的距离， d 为投影系统光心与摄像机光心的距离， P 为栅线节距。

要得到物体的高度轮廓，必须对物体进行标定，取得 l 、 d 、 P 的值。

由几何光学原理可知，只有与摄像机成像面平行的放物平面在摄像机的成像平面上所成的像才与原物体成固定的比例关系。摄像机的成像平面与其光轴

在几何上是严格垂直的,这就为调节系统垂直度提供了一般方法,即调节成像平面与放物平台(参考面)平行^[15]。用一个标准的正方形(或长方形)物体作为标准件对系统垂直度进行标定,将其四个顶点以显著不同的灰度(一般取较深的)标出。通过摄像机可以得到一个近似于正方形的图像,在图像中将四个顶点分别精确定位,从而求出四条边的长度所对应的像素点个数。根据相应像素点个数所表现出来的几何特征对摄像机和放物平面的相对位置进行调节,直到对应边的像素点个数相等即可认为摄像机光轴与放物平面垂直。在认为垂直度基本得到保证以后,可以通过标准件边长与图像中对应边的像素点个数的比值计算出真实物体与图像间的比例关系。一旦确定了这个比例关系,在以后的标定过程中就不再移动摄像机和放物平面,以确保垂直度和比例关系不变。

由于受到测量范围或阴影的限制,对于面积较大的物体或形状较复杂的物体,可以先在某一位置测量出被测表面的一部分(设其子区域为 1),然后移动测量系统,在另一位置测出被测表面的另一部分(设其子区域为 2),两区域之间有部分重叠。

对 2 次测量的结果,要实现拼接,关键是公共重叠区域的处理^[25]。由于系统的坐标系是在变化的,因此必须根据其公共区域对应点坐标系统之间的关系,建立起相应的变换关系,再来确定待测物体的三维坐标。但在光栅投影测量系统移动的过程中,不可避免地要出现平移、倾斜、旋转。因此,要实现对接需要解决 2 次测量时测量系统的平移、倾斜、旋转等所带来的坐标系的变化。设子区域 1 和子区域 2 的坐标系分别为: (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) , 现以子区域 1 的坐标系为参考系,则对于重叠区域内的某一点 i ,有:

$$(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) = (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})T \quad (4.5)$$

式中, T 是 2 个子区域坐标系之间的变换矩阵,它包括平移、倾斜、旋转等方面因素的因子。假定子区域 2 相对于子区域 1 的平移量为 d_x, d_y, d_z ,对 x 轴的旋转角度为 α ,对 y 轴的旋转角度为 β ,对 z 轴的旋转角度为 γ ,则对于重叠区域内的某一点 i ,有:

$$x_{1i} = x_{2i}(\cos\alpha \cos\beta + 2\sin^2\frac{\alpha}{2}\cos\gamma + 2\sin^2\frac{\gamma}{2}\cos\alpha + 2\sin\frac{\alpha}{2}\sin\frac{\gamma}{2}) + d_x$$

$$y_{1i} = y_{2i}(\cos\gamma \cos\beta + 2\sin^2\frac{\beta}{2}\cos\gamma + 2\sin^2\frac{\gamma}{2}\cos\beta + 2\sin\frac{\beta}{2}\sin\frac{\gamma}{2}) + d_y$$

$$z_1 = z_2 (\cos \alpha \cos \beta + 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \beta + 2 \sin^2 \frac{\beta}{2} \cos \alpha + 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2}) + d_z \quad (4.6)$$

这样可得到 T 的表达式为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma & 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \gamma & 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \cos \alpha & 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\gamma}{2} & 1 \\ \cos \beta \cos \gamma & 2 \sin^2 \frac{\beta}{2} \cos \gamma & 2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \cos \beta & 2 \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} & 1 \\ \cos \alpha \cos \gamma & 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cos \beta & 2 \sin^2 \frac{\beta}{2} \cos \alpha & 2 \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\alpha}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ d_x & d_y & d_z \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

(4.7) 式中共有 6 个未知参数, 因此要列出 6 个方程式, 只需要在公共拼接区域内选择 6 个点, 通过方程组 (4.5) 即可以解出它们。可以将子区域 2 的坐标系与子区域 1 的坐标系移到一起, 消除 2 次测量之间的平移、旋转和倾斜, 实现子区域图像的拼接, 得到整个被测面的面形。在实际测量中, 由于采样数据会有误差, 一般取多于 6 个点, 最后用最小二乘法来求解非线性方程组得到最优解。

如图 4-7, 总共模拟测量了 4 个子区域, 取不同的参数, 然后由子区域 2、3、4 向子区域 1 进行拼接, 最后即可得到整个三维表面的信息。

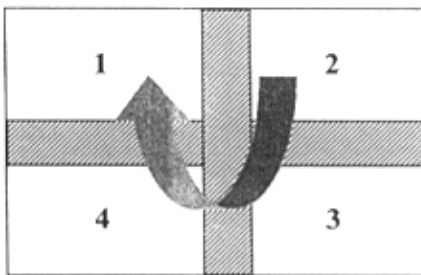


图 4-7 对大目标物体进行多次拼接

4.7 小结

这一章我们提出了一种利用灰度编码与位相编码技术相结合的光栅投影测量方法，并详细讨论了这种测量方法的原理，步骤与优点。并且，讨论了由这种方法产生的误差，我们提出了一种有效的消除误码和误码传播的算法。最后，我们分析了标定以及测量大目标物体时的拼接问题，并提出了一种拼接的方法。

第5章 光栅投影三维物体重建及可视化

5.1 引言

由上一章我们取得了目标三维物体的深度信息,由光栅图像上的二维坐标 (x, y) 点和这一点对应的深度信息 z ,构成一个三维坐标点 (x, y, z) 集^[7]。这一章我们将利用计算机可视化原理对其进行重建,显示以及处理。

三维物体重建一般可分为两类^[6]:实体重建和表面重建。实体重建是重建三维物体的实体。一般是先从三维图像中按体素点的灰度性质分割出代表三维物体实体的体素(即图像分割),然后把这些分割出的体素按空间关系连接起来组建成三维物体的实体。体素的空间关系一般采用连通性。表面重建是组建三维物体的表面。一般是先从三维图像中分割出代表三维物体表面层的体素,然后采用连通性把这些分割出的表面层体素连接起来组建成三维物体的表面层。

实体重建是重建整个三维物体,包括三维物体的表面和内部,因而重建速度较慢,生成的数据量较大。因为是整个物体的重建,所以一般用于三维物体的实体特征研究和三维物体的实体显示。表面重建只重建三维物体的表面层,因而重建的速度快,生成的数据量较小。因为只是三维物体表面的重建,所以一般只用于三维物体的表面特征研究和三维物体的表面显示。

目前,在众多表面显示方法中,虚拟现实是最流行的显示方式。虚拟现实显示需要用三角形,四边形或多边形来重建三维物体的显示表面。这种表面重建可以分为两类,一类是体素级重建,另一类是切片级重建。体素级重建主要采用立方体法(Cuberille)^[17],移动立方体法(Marching Cube)^[18]和分解立方体法(Dividing Cubes)^[19]。切片级重建主要采用环行轮廓拼接方法^[20]。在此基础上后来又报道了一些改进方法^[21-23]。和体素级重建相比,切片级重建的优点是在三维物体显示表面重建中可以把三维问题转化成二维问题。

还有一种三维重建的方法是投影重建^[24],它的原理是:将三维物体表面上的点沿平行线投影到二维平面上,变换平行线与物体表面的夹角,可以将物体上的所有可视点投影到二维平面上,产生投影的序列图,利用人的视觉停留效

应将投影序列图连续显示获得物体视觉效果上的三维视图。

这一章我们将分别讨论实体重建，投影重建以及虚拟现实表面重建。然后介绍怎样用 OpenGL 来对重建出的三维目标进行显示^[26]，并在此基础上对其进行光滑，透明，阴影，光照等处理和进行拖动，旋转等互动操作。

5.2 光栅投影实体重建

三维物体实体重建一般采用由二维连通法推广到三维的连通法进行三维物体重建。连通法的基本原理是，如果图像中的某个像素点 $p(x, y, z)$ 位于图像中属于某个物体 i 的某个像素点 $q(x, y, z)$ 的邻域内，或者像素点 q 位于像素点 p 的邻域内，则像素点 p 与像素点 q 连通，即像素点 p 与物体 i 连通，也即像素点 p 属于物体 i ，于是把像素点 p 分类到物体 i 的集合中。

在二维连通法中，一个点的邻域有两种定义：4 邻域和 8 邻域。4 邻域包含上，下，左，右 4 个点，如图 5-1 (a) 所示。8 邻域包含 4 邻域的 4 个点和对角线上的 4 个点，如图 5-1 (b) 所示。多数情况下采用 8 邻域。对于二维连通性，Rosenfeld 做了比较深入的理论研究^{[27] [28]}。

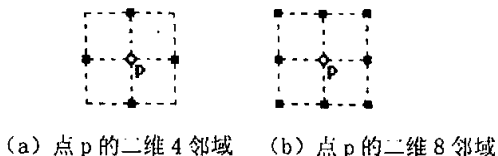
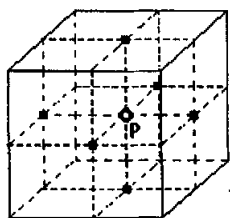


图 5-1 点 p 的二维邻域

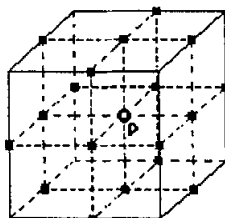
由二维连通法的邻域可推广到三维连通法的邻域。三维连通法的邻域有三种定义：6 邻域，18 邻域和 26 邻域。6 邻域包含上，下，左，右，前，后 6 个点，如图 5-2 (a) 所示。26 邻域包含立方体面上的 26 个点，如图 5-2 (c) 所示。18 邻域包含 26 邻域中去掉 8 个角上的点后剩下的 18 个点，如图 5-2 (b) 所示。

基于连通法，用于二维物体组建的比较通用的二维连通区域组建方法有扩散法^[20]，边沿跟踪法^[20]，行程法^[21]，填充法^[22]，以及 Micro Vision 采用的二维

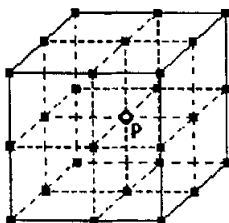
种子法和洪水法等。扩散法是从某区域边上一点开始，向它的邻域点扩散，



(a) 点 p 的三维 6 邻域



(b) 点 p 的三维 18 邻域



(c) 点 p 的三维 26 邻域

图 5-2 点 p 的三维邻域

直到没有邻域点可扩散为止。边沿跟踪法是沿着一个区域的边沿，向区域内部一层一层地扩散，自到内部没有点可扩散为止。行程法是先找出一行中的连通段，然后把下行中和上行中相邻的段连通。填充法是从区域边界内的一点开始填充，直到区域填满为止。种子法是在某区域内播下一粒种子，然后加入种子的邻域点使种子长大，直到种子没有邻域点为止。洪水法是洪水从区域的边沿开始向水前沿的邻域流去，直到整个区域被淹没为止。

目前来说，实体重建法重建出来的物体的阴影效果和点光源效果等三维视觉效果差，而且这种方法产生的物体的数据量巨大，这些缺陷限制了其广泛应用。但是由这种方法重建的物体可以得到物体内部的所有信息，用来分析物体所有部分的特征，所以在某些场合下，还是很有价值的。

光栅图像上的二维坐标 (x, y) 点和这一点对应的深度信息 z ，构成的三维坐标点 (x, y, z) 集进行行程法实体重建。实验结果如图 5-3 所示：

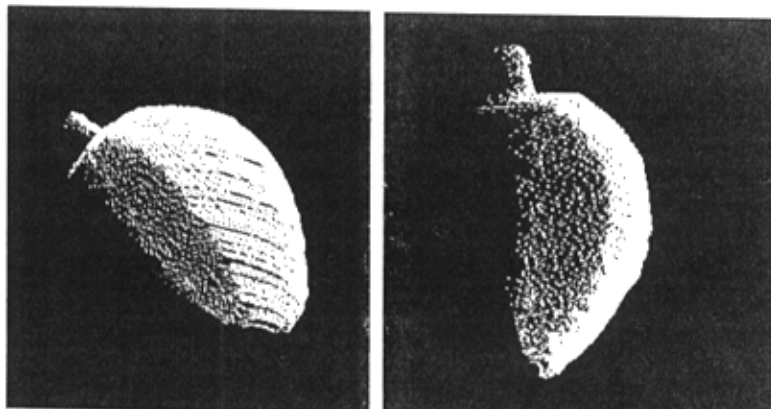


图 5-3 鼠标实体重建结果

5.3 光栅投影的投影重建

将三维物体表面上的点沿平行线投影到二维平面上，变换平行线与物体表面的夹角，可以将物体上的所有可视点投影到二维平面上，产生投影的序列图，将投影序列图连续显示获得物体视觉效果上的三维视图的方法就是投影重建显示方法。图 5-4 是投影重建时三维空间与二维平面的对应关系示意图：

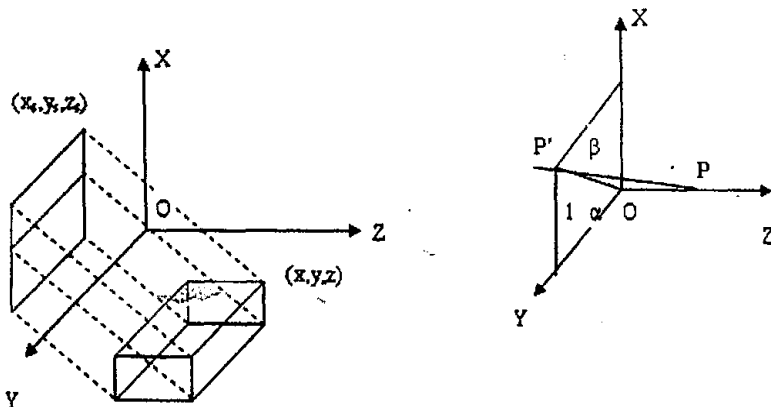


图 5-4 投影重建时三维空间与二维平面的对应关系

投影方向不垂直于投影平面的平行投影就称为斜平行投影。设 l, α 为斜平行投

影的变形系数，如图上图所示。考察三维空间中的点 $P(0,0,1)$ ，其在 XOY 平面上的投影为 $P'(l\cos\alpha, l\sin\alpha, 0)$ ，投影方向为 PP' ，投影方向线与 XOY 平面的夹角为 β ，其方向余弦为 $(l\cos\alpha, l\sin\alpha, 1)$ 。现考察三维空间中的任意点 (x, y, z) 在 XOY 平面上的投影 (x_s, y_s, z_s) ，因为平行投影中投影方向与投影线平行，投影线方程为：

$$\frac{z - z_s}{-1} = \frac{x - x_s}{l\cos\alpha} = \frac{y - y_s}{l\sin\alpha}$$

又因为投影在 XOY 平面上， $z_s=0$ ，所以有：

$$\begin{cases} x_s = x + z \cdot l\cos\alpha \\ y_s = y + z \cdot l\sin\alpha \end{cases}$$

上式写成矩阵形式为：

$$[x_s \ y_s \ z_s \ 1] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ l\cos\alpha & l\sin\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

利用上式可以求得三维空间 XYZ 中任意一点在 XOY 平面上的投影点坐标。同理可求得三维空间点在 YOZ 平面和 XOZ 平面上的投影点坐标。在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 改变 β 的大小就可以得到三维空间中任意角度的投影平面。

光栅图像上的二维坐标 (x, y) 点和这一点对应的深度信息 z ，构成的三维坐标点 (x, y, z) 集，如果把深度 Z 当成序列图的层数，然后对 z 从 $1-\text{Max}(z)$ 构成的序列图进行投影即可得到投影重建图。

下面是鼠标图像序列化图中的几幅所示：

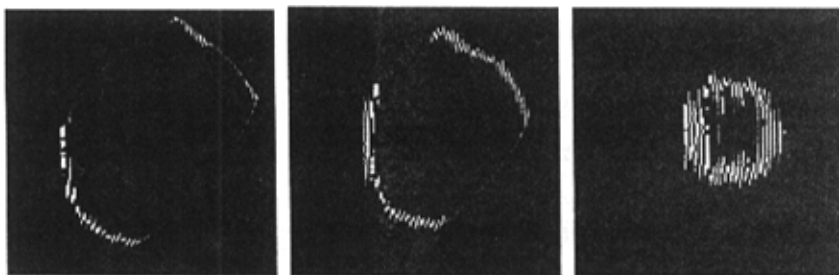


图 5-5 鼠标图像序列化图

对该序列图像作投影重建的结果图如下：(限于篇幅值显示了三个角度的图)



图 5-6 鼠标图像投影重建

由图 5-5, 5-6 可见, 对于原始图像不是很清晰, 目标不便于分辨的鼠标序列图, 用投影重建显示可以清楚地获得鼠标的三维视图, 且数据量小, 运行速度快。但是投影重建显示方法操作不太方便, 看到的三维物体只是一种视觉效果, 并没有生成真正的三维模型, 因此不能对三维物体进行空间旋转或三维数据测量等操作。

5.4 光栅投影虚拟现实表面重建

表面重建一般可以分为两类, 一类是体素级重建, 另一类是切片级重建。

切片级的表面重建也叫基于轮廓的表面重建, 有的文献上也称为连接轮廓线法^[29], 它是最早被用来进行三维物体表面重建的方法。它首先将每层图像的轮廓提取出来, 然后用以轮廓线点为定点的三角形将每层的轮廓线连接起来, 从而拼接出物体表面。但是该算法中每两个相邻层轮廓线对应点的确定和连接常常是难以解决的问题。

切片级的三维物体表面重建虽然数据量小, 显示速度快, 但是它涉及的一些问题还没有很好的解决, 如轮廓对应, 还有一些技术实现起来较困难, 编程复杂, 而且重建出来的物体表面不平滑, 所以限制了它的应用。基于体素的表面重建是根据物体像素的空间关系来进行表面重建的方法。此方法可分为两类: 移动立方体法(Marching Cube)和边界立方体法。边界立方体法的基本原理是将物体表面的每个像素用一个立方体来表示。用这种方法重建出来的物体表面很

不平滑,显示视觉效果差。移动立方体法(Marching Cube 算法)的基本原理是在空间中任取一个立方体,如果该立方体的8顶点结构是物体的表面点,就顺着这些表面点构造曲面,将目标和背景分隔开,这些曲面的集合就是重建出来的三维物体表面。这种方法重建的物体表面平滑,视觉效果好,但是它需要进行后续处理,否则会出现空洞^[16],因此编程复杂,速度也较慢。

我们针对光栅图形的特点,创建了一种编程简单,速度快的三维表面重建算法。它把由光栅投影得到的物体表面点及其解出的深度信息构成的三维点集 (x, y, z) 在三维空间中按一定规则联结成许多三角形面状体,由这些三角形面状体的集合可以构成三维物体的表面。由于虚拟现实是目前流行的三维显示方式。我们将我们的三维数据传入虚拟现实语言的 IndexedFaceSet 指令和 Coordinate3 指令的参数里,来达到绘制复杂三维表面的目的。下面是具体算法:

设 (x,y) 为光栅图像上的点, $H(x,y)$ 为 (x,y) 点的深度信息。设光栅图像的宽度为 W ,高度为 H 。

1. 创建一个后缀为.wrl的文件,文件权限为可写。打开文件,向文件里写入VRML的头和参数。
2. 对光栅图像逐行逐点扫描,把每一点 (x, y) 和这一点深度 $H(x,y)$ 按格式: $x, y, H(x, y)$,写入文件中。
3. 向文件里写入VRML的格式和参数。
4. 按光栅图像逐行逐点扫描,把每一点 (x, y) 和这一点深度 $H(x,y)$ 形成的三维点集按照如图5-7所示顺序联结起来,图中 P_1 为第一行的第一点, P_2 为第一行的第二点, P_3 为第二行的第一点, P_4 为第二行的第二点。按照 $P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ 的顺序联结起来,接下来把 P_1, P_2, P_3, P_4 分别向右移动一点(如 P_1 就移动到 P_2 位置)然后按照 $P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ 顺序联结起来。依次类推,把 P_1, P_2, P_3, P_4 分别向右移动后联结,当移动到最后一一点时,转移到下一行(如 P_1 就移动到了 P_3, P_3 移动到了 P_3 的下一行),然后再向右移动,直到移动到图像的最后一行的最后一一点。把上述过程产生 $(P_3, P_2, P_1, -1), (P_3, P_4, P_2)$,全部写入到文件里。

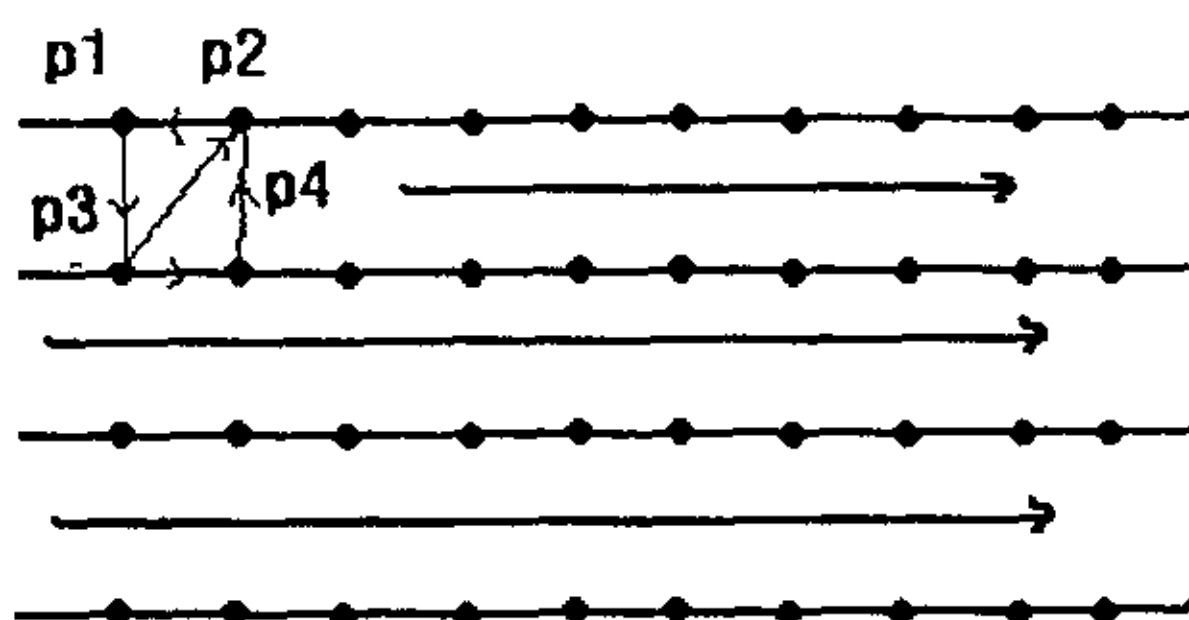


图 5-7 三维点联结成三角面状

5. 向文件里写入 VRML 的尾和参数，关闭文件。

经试验证明，用这种方法比传统的 Marching Cube 算法和其他一些改进的表面重建算法^[16]快 3~6 倍。

5.5 OpenGL 技术介绍

OpenGL 是 SGI 公司开发的一套高性能的图形处理系统，是图形硬件的软件界面，GL 即代表图形库(Graphics Library)。通过 OpenGL 程序员可以创建交互式的应用程序，具有逼真效果的三维图形图像，非常适用于高实时性，大量计算和渲染的仿真中。我们用它来绘制光栅重建后的三维目标。这一节我们讲述一下我们将用到的 OpenGL 的一些相关技术。

OpenGL 为程序员提供了程序与输入输出设备之间的功能接口，定义了一个独立于语言的图形核心系统。在实际应用程序的编写过程中，用符合语言约定的方式把 OpenGL 嵌入到相应的语言之中即可。OpenGL 在图形应用中的地位如图 5-8 所示：

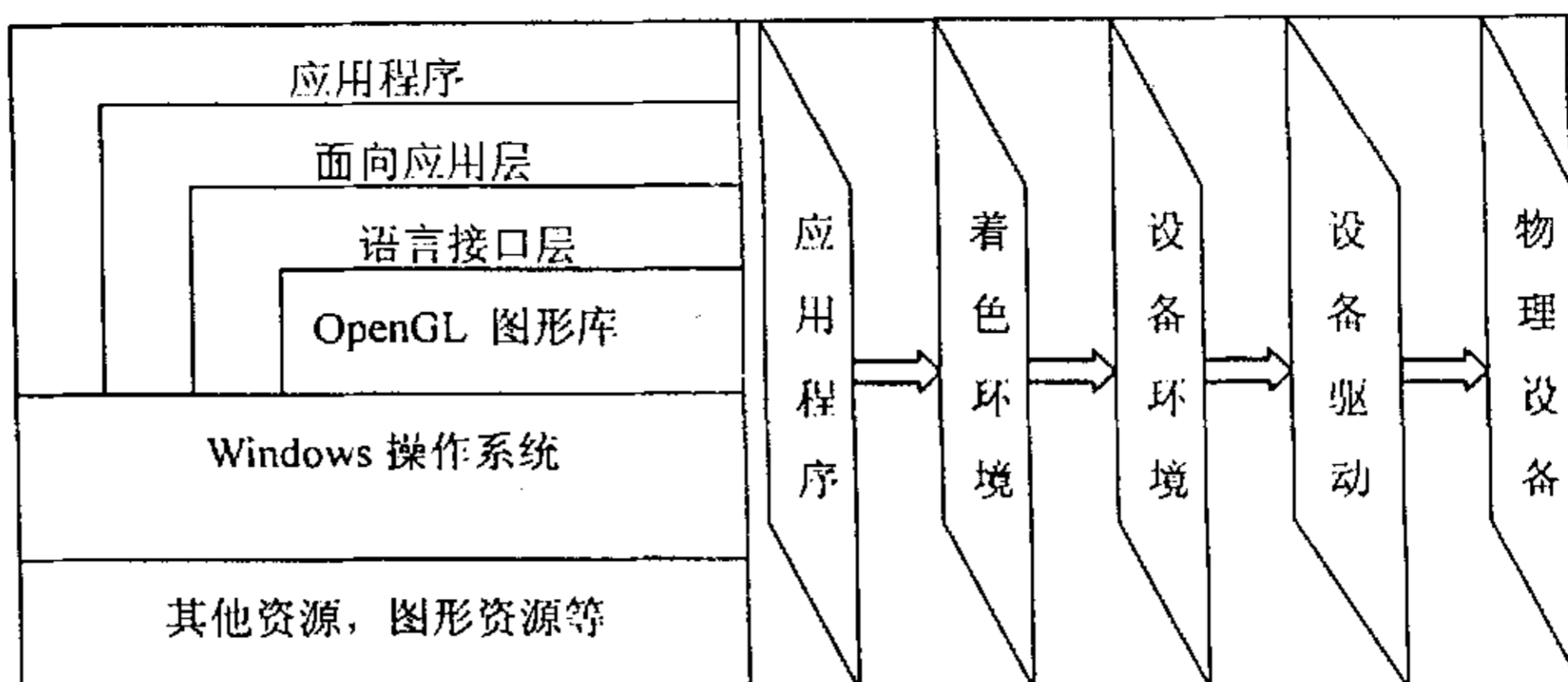


图 5-8 OpenGL 的地位

图 5-9 是 OpenGL 的模块框图：函数从左侧进入，通过一系列类似管道的处理过程。一些命令指定要绘制的几何物体，另一些在不同的操作阶段控制对物体的处理。

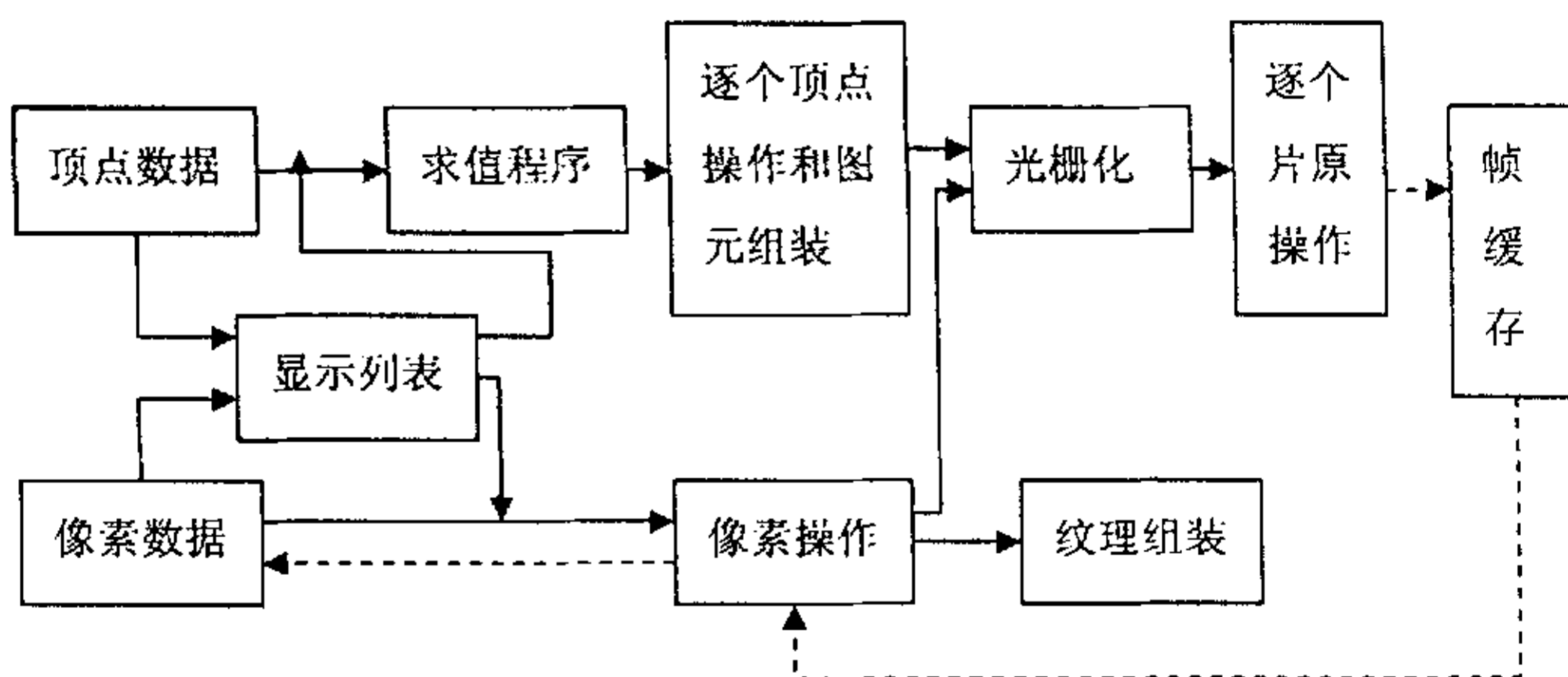


图 5-9 OpenGL 的模块框图

如图中所示，OpenGL 并不让每个函数立即通过处理管道，而是把它们累积在一个显示列表中，稍后一次性处理。处理管道的求值阶段，通过对输入数据的求值多项式，提出了一种高效的方法来绘制几何曲线和曲面。下一阶段进行对每个顶点的操作和图元组合。对顶点进行变换何光照处理，对图元进行裁减以适合视区大小，这样便为下一阶段的处理做好了准备。在光栅操作中，通过点、线段、多边形的二维描述，产生一系列的缓存地址和相关数值。这样产生的每一片原都传入最后的处理阶段（逐个片原操作）对数据进行最后的处理，

然后将他们作为象素储存在帧缓存中。

5.6 用 OpenGL 技术进行虚拟现实的显示

用 OpenGL 技术进行虚拟现实的显示，可以分以下几个步骤：

1. 首先要加载虚拟现实文件，然后对虚拟显示文件里的语法进行解析^[31]，解析出每个节点和属性。如图 5-10 所示：

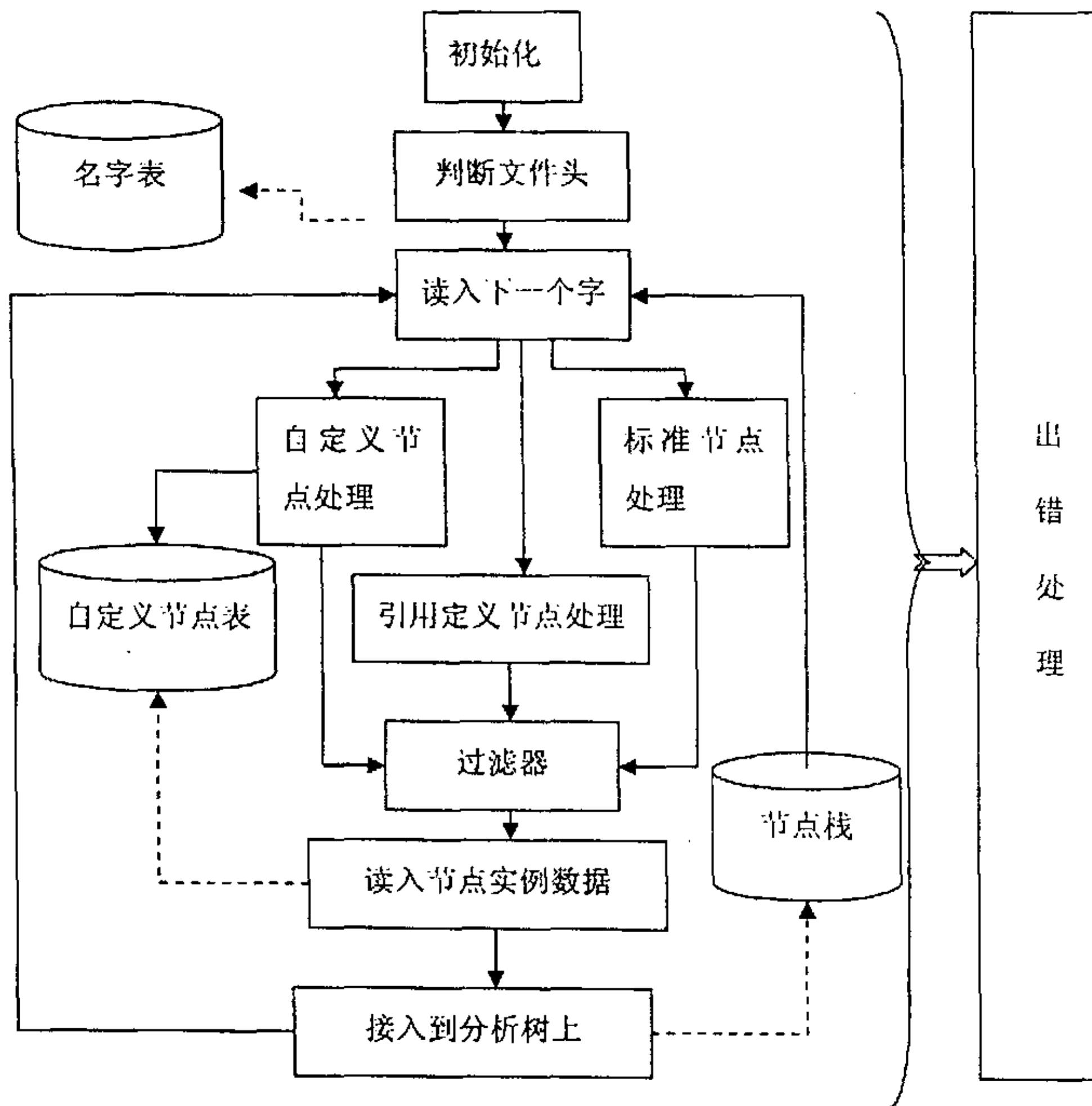


图 5-10 用虚拟现实文件 VRML 语法解析图

2. 对虚拟文件解析后,接着要建立着色环境及对环境初始化。着色环境的建立过程主要是指获取当前图形设备环境句柄,设定象素格式,创建着色环境并将该着色环境指定为当前着色环境。OpenGL 绘图环境的初始化还包括打开或关闭相关的绘图开关、设置光照模型、设置物体材质模型等,其中绘图开关包括法向量单位化使能开关、深度消影使能开关、纹理映射使能开关、照明效果使能开关等,都通过调用 `glEnable` 或 `glDisable` 函数完成。在 OpenGL 中,光照模型和材质模型都是通过对光源或物体表面的泛光 (ambient)、漫反射 (diffuse)、镜面反射 (specular) 等分量来单独计算,然后组合起来。其中,光照模型还需定义位置参数 (position),且可设置多个光源 (最多 9 个) 来加强场景光照效果,在模型参数设置之后通过调用 `glEnable (GL_LIGHTING)` 打开光照处理功能。
3. 对光照和材质模型进行处理。光照处理在显示具有真实感的三维物体时是必须的,没有光照的圆球与圆盘在计算机上的显示没有任何区别。在计算机屏幕上最终显示的象素颜色,同时要反映出在场景中使用光照的特性和物体反射和吸收光的属性。OpenGL 中的光也是由红、绿、蓝组成,光源的颜色由其所发出的红、绿、蓝颜色的数量来决定,而物体材料的属性由在不同方向上反射、入射的百分比决定。在 OpenGL 中, `glColor`, `glLight`, `glMaterial`, `glNormal`, `glShadeModel` 等函数与此有关。
4. 用非均匀有理 B 样条 (NURBS) 绘制曲面显示。针对比较复杂的曲面显示和绘制,OpenGL 提供了一个建立在鉴别器命令之上的高层接口,即 GLU 库中的 NURBS 接口。在 OpenGL 中,使用 NURBS 接口实现曲面绘制可按如下步骤进行:
 - (1) 获取曲面控制点指针、节点矢量指针;
 - (2) 生成曲面法向量,可通过自己计算,也可通过调用 `glEnable (GL_AUTO_NURMAL)` 相动生成;
 - (3) 创建 NURBS 对象指针,通过 `gluNewNurbsRender` 函数定义;
 - (4) 设置 NURBS 对象属性,通过 `gluNurbsProperty` 来设置;
 - (5) 调用 `gluNurbsCallback` 函数诊断是否发生错误;
 - (6) 设置曲面绘制开始标志,由调用函数 `gluBeginsurface` 表示开始;
 - (7) 生成和绘制曲面,通过调用 `glNurbssurface` 函数,以控制点、节

点矢量指针，曲面次数和阶数等为参数；

(8) 设置曲面绘制结束标志，由调用函数`gluEndSurface`完成。

5.7 基于 OpenGL 的三维可视化处理技术研究

上一节我们用 OpenGL 对三维物体进行了基本显示。这一节我们将对三维目标进行可视化处理，包括光滑，拖动，透明，旋转等一系列处理。

1. 光滑处理：怎样在不改变物体目标基本形状的前提下，对三维目标进行光滑处理，是一个值得探讨的问题。我们对 The Charles 提出的循环细分 (Loop smooth subdivision) 算法^[30]进行改进解决了这一问题。如图 5-11 所示：

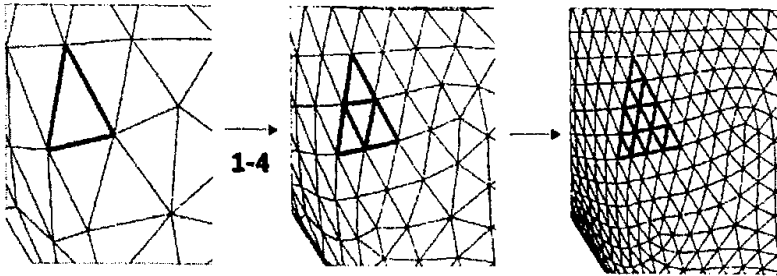


图 5-11 循环细分光滑算法示意图

对任意一个构成物体的三角面元，取其三个边的中点，两两连接这三个点，使原先的一个三角面元，分成了四个小三角面元。在光照的情况下，面元越小，使得面与面之间的光反射越小，在视觉上使的原先看上去有棱的地方，细分过后看上去显得相当平滑。图 5-12 是平滑前后的对比图。

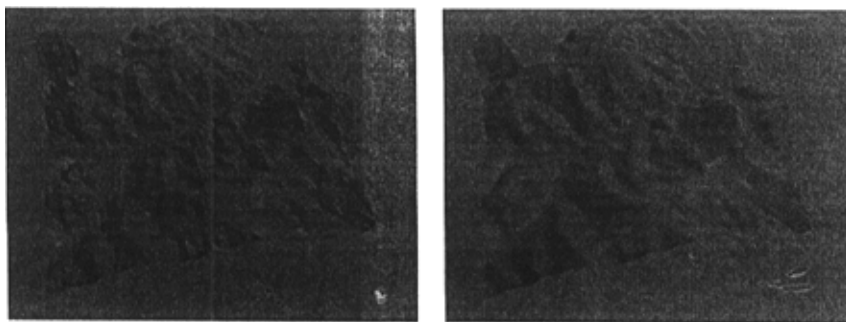


图 5-12 三维表面平滑前后对比图

2. 交互式拖动处理：一个三维物体可能包括多个三维目标。我们用 OpenGL 的方法可以从三维物体中把三维目标拖出来，与三维物体分隔开来。要实现上述交互式拖动，可以按照以下步骤：

- (1) 首先对我们的多个目标进行命名。可以用 OpenGL 中的 `glLoadName(GInt name)` 函数进行命名（必须采用无符号整数命名）。
- (2) 把渲染模式更改为选定模式：`glRenderMode(GL_SELECTION)`，(3) 用 `glSelectBuffer` 函数来分配和指定选定缓冲区。
- (4) 对点击的目标进行检选。在选定期间，当利用鼠标位置创建并使用已修改的视见空间时，就会产生检选（pick）。当在场景中的鼠标位置之下创建一个较小的视见空间时，只用那些位于视见空间内的将被绘制的对象才会产生点击记录，这个过程就是检选。用 `gluPickMatrix` 可以实现检选。
- (5) 然后将渲染模式切换到 `GL_RENDER`。选定缓冲区是一个无符号的整型数组，当产生鼠标点击时，在渲染模式为 `GL_RENDER` 时，点击记录会填充选定缓冲区。当用 `glRenderMode` 函数实现这种功能时，`glRenderMode` 的返回值就会返回复制的点击记录的数目并且可以得到检选的命名目标。
- (6) 对 (5) 返回的命名目标，把目标按照鼠标移动的方向移动。

图 5-13 是拖动前后的对比图，左图为一堆岩石，右图把其中一个石头（红澄色）拖动了一段距离。

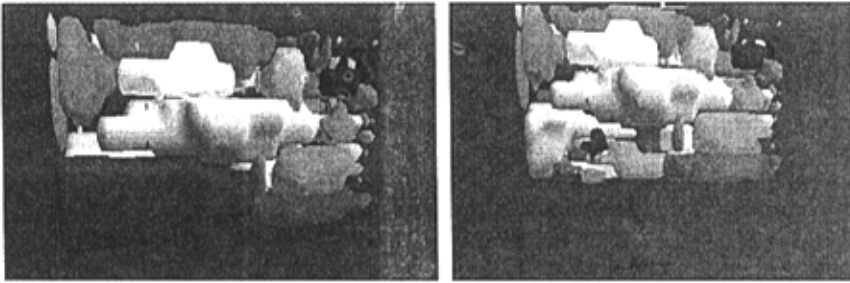


图 5-13 目标拖动前后的对比图

3. 透明处理：当物体目标过多时，很多目标可能被其他目标遮挡而不可见。这时可以采用透明处理使其可见。在 OpenGL 中我们可以采用混色方法制作透明效果。混色其实就是把源颜色和目标颜色进行一定的混合产生新的颜色值。在 OpenGL 中，混色提供了对颜色缓冲区中 RGBA 颜色存储的像素级控制。为了在 RGBA 窗口中能够混色，必须先调用 `glEnable(GL_BLEND)`。之后可以用两个参数调用 `glBlendFunc`：源颜色和目标的混色函数。然后通过 `glColor` 和颜色缓冲区中的目标颜色，可以将混色函数应用于源颜色设置，混色函数的结果加到一起，来产生透明效果。具体可如下：

```
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA);  
glEnable(GL_BLEND);  
glColor4f(1.0, 1.0, 1.0, 0.25); // 其中 0.25 为透明度。  
glutSolidTeapot(1.0); // ..... // 绘制目标。
```

图 5-14 为透明前后对比图：

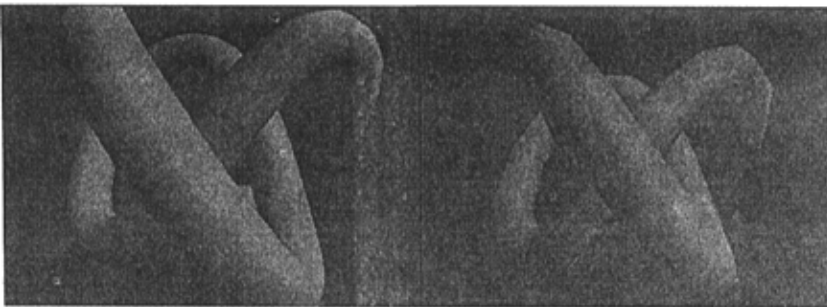


图 5-14 目标物体透明前后对比图

5.8 小结

本章首先讨论了三维重建的分类,并对由光栅投影得到的物体表面点及其深度信息构成的三维点集 (x, y, z) 分别进行了实体重建,投影重建,表面重建,并在此表面重建基础上我们提出了一种快速的虚拟现实表面重建算法。最后讨论了如何利用 OpenGL 对三维物体进行显示,以及如何实现光滑,透明,阴影,光照等处理和进行拖动,旋转等互动操作。

第 6 章 实验结果及数据

这一章我们将用实验来检验我们前面几章的提出算法和理论，并对实验结果进行归纳与展示。

6.1 实验流程

具体的实验流程比较复杂，这里给出了一个简单的框图流程图，如图 6-1：

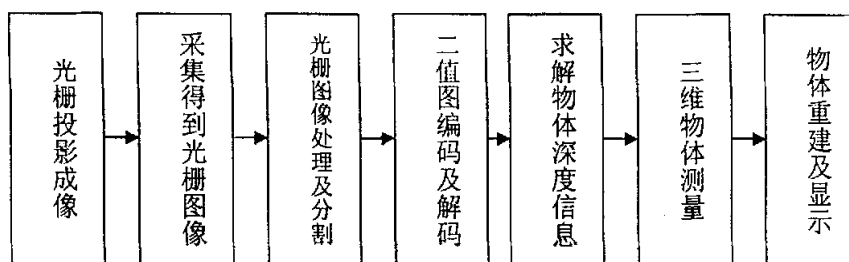


图 6-1 光栅投影三维成像及重建试验流程图

6.2 实验结果及数据

我们对人头石膏像,鼠标,圆柱梯形等一系列物体进行了光栅投影重建,都取得了很好的效果。下面以人头石膏像为例介绍。

1. 图 6-2 是我们的光栅投影采用的原始光栅：

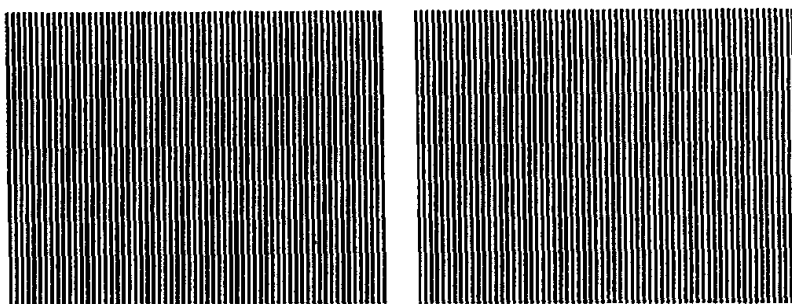


图 6-2 正弦像移编码条纹 (右图为左图移像 $\pi/4$ 的结果)

2. 物体经光栅投影后通过采集设备采集到计算机的原始图像如 6-3:

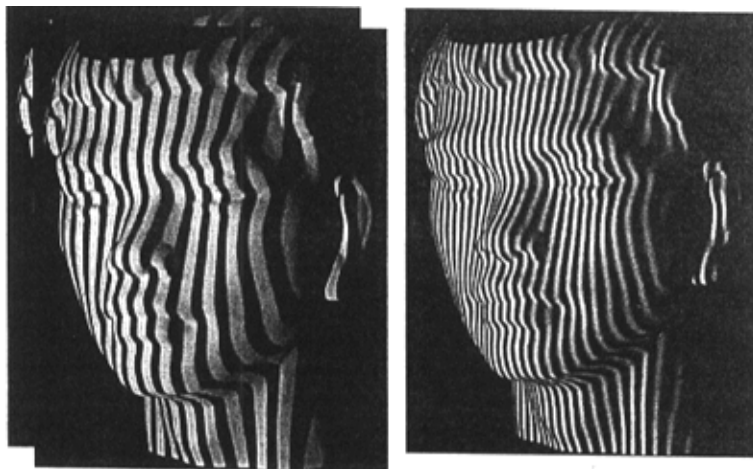


图 6-3 二维光栅投影图像(左为二值编码投影图像,右为正弦相移投影图像)

3. 经过背景校正,中值递归滤波等预处理后的投影图像如图 6-4:

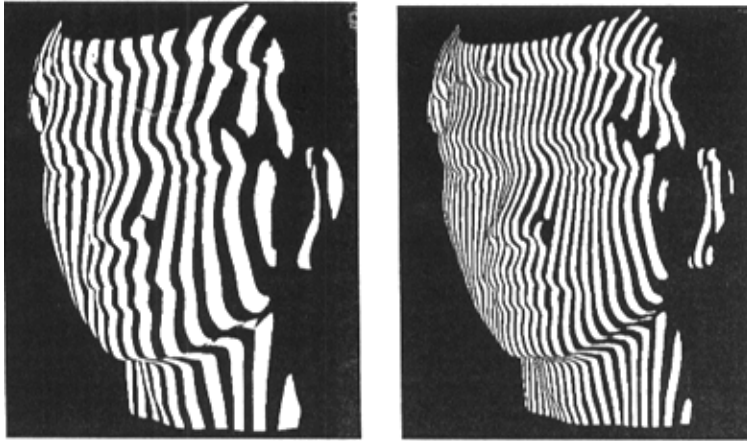


图 6-4 预处理后的投影图像(左为二值编码投影图像,右为正弦相移投影图像)

4. 二值化,旋转滤波后的投影图像如图 6-5

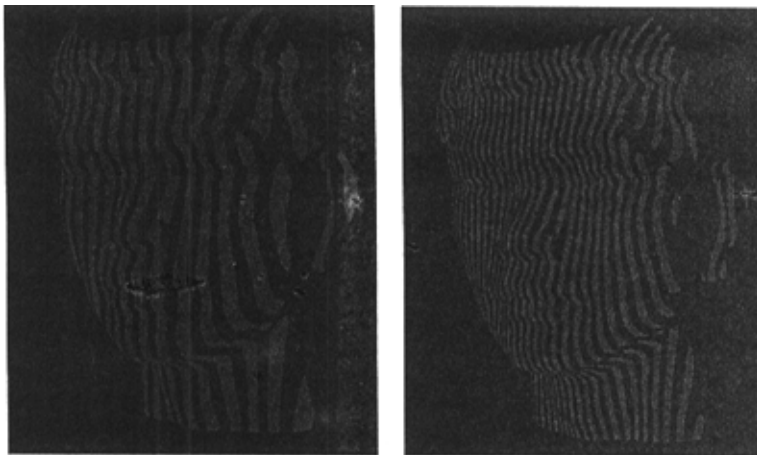


图 6-5 二值化后的投影图像(左为二值编码投影图像,右为正弦相移投影图像)

5. 二维光栅投影解码图像如图 6-6:

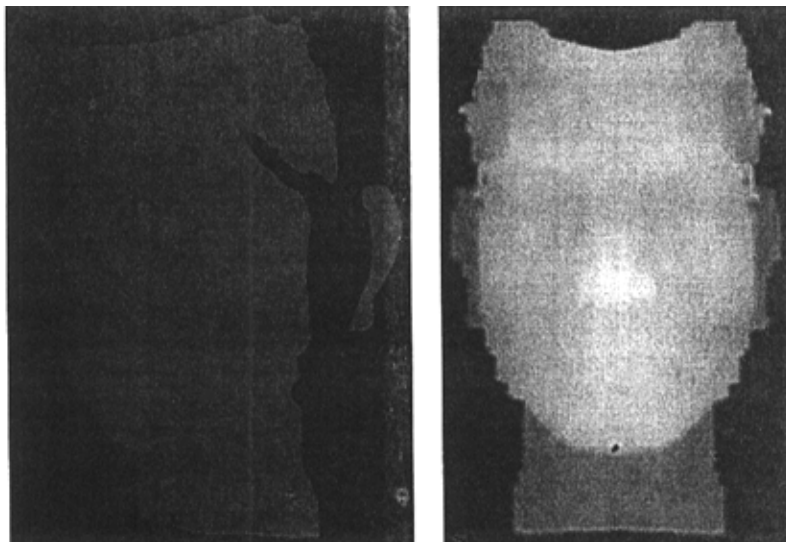


图 6-6 二维光栅投影解码图像(左: 位置编码图像 右: 深度信息图像)

6. 图 6-7 是根据深度信息对物体重建后由虚拟现实显示的效果图:

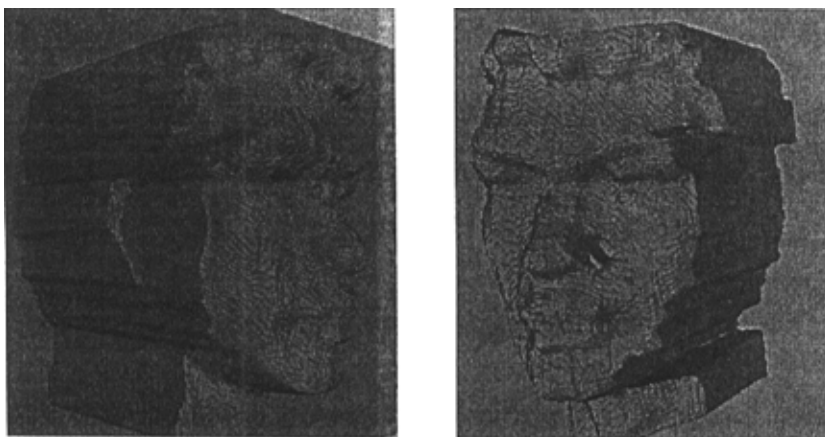


图 6-7 人头石膏像重建后效果图

7. 其他物体重建后的效果图如图 6-8:

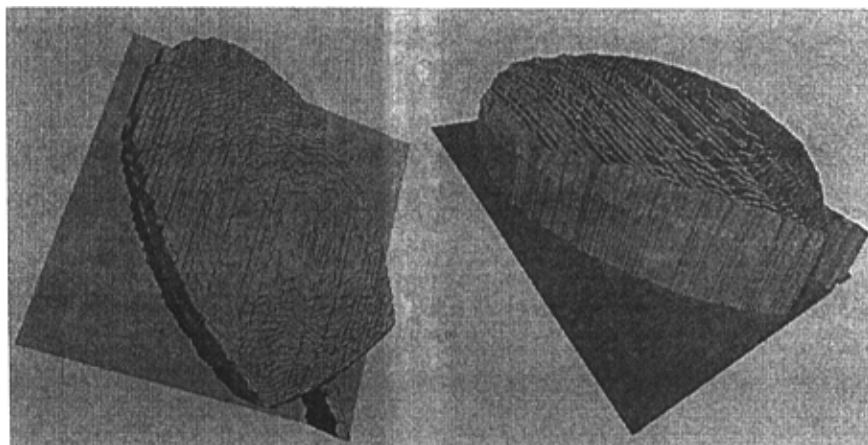


图 6-8 电脑鼠标重建后的效果图

8. 物体测量的数据图如图 6-9, 6-10:

标定: 摄像机光心到参考面的距离为 500mm, 投影系统光心与摄像机光心的距离为 500mm, 栅线节距为 1.9, 图 6-9 是鼠标一部分表面点真实高度与测量高度对比表, 图 6-10 是原始高度与测量高度对比图。

原始高度	21.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	24.00	25.00	25.00	25.00
测量高度	21.97	22.25	23.62	23.90	24.72	24.72	24.99	25.27	25.27	25.27
原始高度	21.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	24.00	25.00	25.00	25.00
测量高度	21.97	22.25	23.62	23.90	24.72	24.72	24.99	25.27	25.27	25.27
原始高度	21.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	24.00	25.00	25.00	25.00
测量高度	21.97	22.25	23.62	23.90	24.72	24.72	24.99	25.27	25.27	25.27
原始高度	21.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	24.00	25.00	25.00	25.00
测量高度	21.97	22.25	23.62	23.90	24.72	24.72	24.99	25.27	25.27	25.27
原始高度	21.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	24.00	25.00	25.00	25.00
测量高度	21.97	22.25	23.62	23.90	24.72	24.72	24.99	25.27	25.27	25.27
原始高度	21.00	22.00	23.00	23.00	24.00	24.00	24.00	25.00	25.00	25.00
测量高度	21.97	22.25	23.62	23.9	24.72	24.72	24.99	25.27	25.27	25.27

图 6-9 鼠标一部分表面点真实高度与测量高度对比表

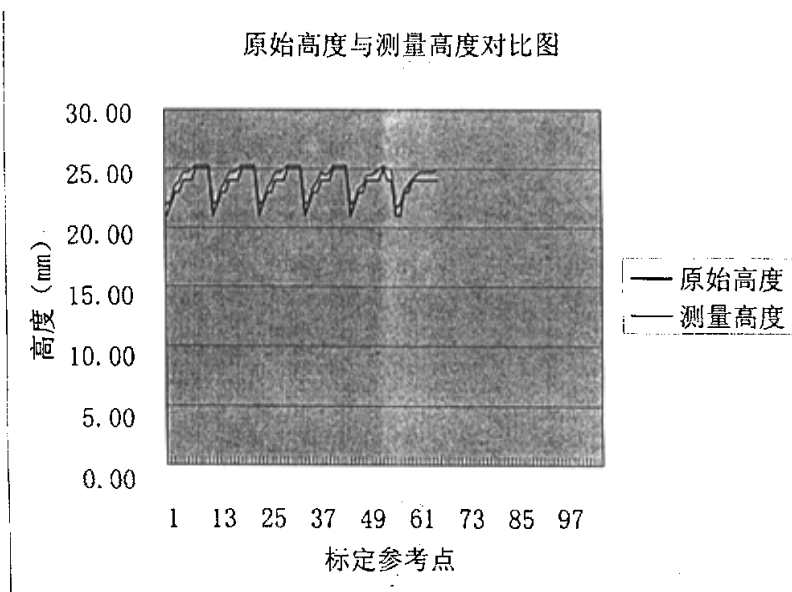


图 6-10 原始高度与测量高度对比图

由图 6-10 可以看出测量数据曲线与原始高度曲线基本吻合，在一个很小的范围内波动。

6.3 小结

本章按照实验步骤对实验数据进行了展示，并且对实验结果进行了对比，从实验角度验证了前面几章的理论与算法。

第7章 结论

7.1 结论

在快速发展的工业社会里,三维物体的建模及测量技术占有越来越重要的地位,同时对其应用也提出了越来越高的要求。针对目前基于立体视觉的三维表面恢复系统中常存在的速度、精度、自动化程度、可视化等问题,本文提出了一种采用光栅投影学原理以及计算机图像处理技术相结合来实现对物体形状进行三维检测的方法并对其相关的图形、图像处理,计算机三维可视化等关键技术进行了研究,主要得出以下结论:

1. 提出了一种基于二进制编码与位相编码相结合的光栅投影成像三维物体重建及测量系统。该方法先用二进制编码获得图像各点的近似相位值,然后用相移法在编码区间内进行相移取得精确相位值,该方法使去包裹相操作在较小的区域内进行,解决了精确取包裹相位难的问题,体现了由粗到细的精确三维物体测量过程。我们给出了该方法的系统结构图以及软硬件处理流程图。该系统与同类系统的比较看出,本文系统具有结构简单、精度高、速度快、适用面广、自动化程度高等特点。
2. 针对本文系统中的光栅条纹图像,易受到一些不确定性因素的干扰如成像过程中的各种环境因素、图像扫描时序因素、镜头因素、传感器因素、图像的传输过程、量化过程等,我们提出了一种快速背景校正算法来校正因成像时光线明暗或镜头因素引起的对比度不高的情况,提出了一种快速中值滤波算法对图像进行滤波和增强。由于有黑白条纹组成的光栅图像相对于一般图像对比度较高,我们提出了一种局部自适应阈值法分割算法对其进行二值化分割,针对分割过程中出现的黑白点孤立噪声,我们提出一种二值图像旋转滤波算法对其进行消除。另外,我们还把光栅图像点分为有效点和无效点,只对有效点进行出理,大大加快了处理的速度和准确度。
3. 分析了本文系统种可能出现的误差,并提出了一种有效的消除误码和误码传播的算法,纠错后误码率大大降低。针对目标物体的测量,我们分析了标定

以及测量大目标物体时的拼接问题，并提出了一种拼接的方法。

4. 对由光栅投影得到的物体表面点及其深度信息构成的三维点集分别进行了实体重建，投影重建，表面重建，并在此表面重建基础上我们提出了一种快速的虚拟现实表面重建算法。最后讨论了如何利用 OpenGL 对三维物体进行三维显示和可视化研究，以及如何实现光滑，透明，阴影，光照等处理和进行拖动，旋转等互动操作。

7.2 进一步工作

本文的技术不仅可用于三维数据获取，而且可以用于虚拟现实、机器视觉、实物仿真、工业检测、逆向工程、动态和瞬变过程研究、影视特技、三维动画等方面，因此有必要对其进行进一步研究。概括起来可从下面几个方面着手：

1. 投影光模式

用非正弦投影光模式的相移代替正弦投影光模式的相移。在实际测量中，只有在理想情况下光强函数才是周期函数。造成函数非周期性的原因：1 测量定位时产生的投影光栅的机械对齐误差，这种误差造成相移各步有不同的周期长度；2 因为投影光栅幻灯片放映时存在摆动，并且通过调节光栅不可能使它精确地垂直于估计轴，所以每一个光栅的焦距和投影放大率不同，这就造成每个光栅有不同的周期。此外，测量的周围环境以及投影光源产生的热也会影响到光强函数的周期性和正弦性。因此，为了获得良好的测量结果，可以建立新的光强函数模型。

2. 误差的定量分析。对于由二维图像信息恢复三维物体信息，其误差引起式方面的。因此，如果对其多样性的误差给出定量分析，可以提供测量准确度和精度，降低测量误差。
3. 更逼真的三维显示效果。针对各种应用领域，可能需要更真实逼真的显示效果，开发出速度快，处理能力强，显示真实逼真的三维显示软件，有利于实时化测量和自动化领域的应用。

参考文献

- [1] 许庆红等, 机械零件三维形貌的光栅投影测量系统 《机械科学与技术》2000.9 第19卷5期
- [2] 江辉等, 面向工艺品的开放CAD系统 《昆明理工大学学报》2001.8 第26卷4期
- [3] 姚深等, 牙颌模型专用激光三维扫描分析系统的研制及应用 《口腔医学纵横杂志》2002.11 第16卷第4期
- [4] Takeda M, Hideki I, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J].J.O.S.A,1982,72(1):156-160
- [5] 陈晓荣, 蔡萍, 施文康等 光学非接触三维形貌测量技术新进展 《光学精密工程》第10卷 第5期 2000.10
- [6] Srinivasan V, Automated Phase-measuring Profilometry: a phase mapping approach[J],appl.Opt,198,24(2):185-188
- [7] 孙晓刚等, 光栅投影图像的3D表面重建 《信息与电子工程》2003.9 第一卷 第3期
- [8] 徐建华, 图像处理与分析[M], 北京: 科学出版社, 1999
- [9] L. A. Ferrari, RVSankar, S. Shinnaka. Recursive Algorithms for Implementing Digital Image Filters[J], IEEE Trans on PAMI, 1987, 9:61466.
- [10] P. Salembier. Adaptive Rank Order Based Filters[J]. Signal Processing, 1992, Vol. 27: 1-25.
- [11] 吴剑波, 三维视觉表面恢复系统及其图像图形处理技术研究 2002.1
- [12] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M], 国防工业出版社, 1998.
- [13] 刘维一等, 采用反相位线性结构光栅编码的相移测量三维轮廓术, 《光电子·激光》第10卷 第5期 1999.10
- [14] 刘维一等, 两位二进制彩色编码光栅三维轮廓术, 《光电子·激光》第11卷 第2期 2004.4
- [15] 许庆红等, 光栅投影轮廓测量的系统标定技术, 《光学技术》第26卷 第二期 2003.3
- [16] 王卫平, 三维医学图像的分割重建和特征提取研究 2001.9
- [17] Herman G T and Liu H K. Three-Dimensional Display of Human Organs from Computed Tomograms. Computer Graphics Image Processing, 1979, Vol. 9.
- [18] Lorensen W E and Cline H E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction

- Algorithm. *Computer Graphics*, 1987, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169.
- [19] Cline H E and Lorensen W E. Two Algorithms for the 3D Reconstruction of Tomograms. *Medical Physics*, 1988, Vol. 15, No. 3, pp. 225-233.
- [20] Keppel E. Approximating Complex Surface by Triangulation of Contour Lines. *IBM J. Research and Development*, 1975, Vol. 19.
- [21] Kehtarnavaz N and de Figueiredo R J P. A Framework for Surface Reconstruction from 3D Contours. *Computer Vision Graphics Image Processing*, 1988, Vol. 42.
- [22] Chang L W, Chen H W, Ho J R. Reconstruction of 3D Medical Images: A Nonlinear Interpolation Technique for Reconstruction of 3D Medical Images. *Computer Vision Graphics Image Processing: Graphical Models and Image Processing*, 1991, Vol. 53, No. 4, 298-309.
- [23] Meyers D, Skinner S and Sloan K. Surfaces from Contours. *ACM Transactions on Graphics*, 1992, Vol. 11, No. 3.
- [24] 孙家广等, 清华大学出版社《计算机图形学》新版, p345-355 1995.5
- [25] 吴新民等, 利用子区域拼接法实现大型物体的 3D 面形测量《南京理工大学学报》第 25 卷第 3 期
- [26] 和平鸽工作室, 清华大学出版社《OpenGL 三维图形系统开发与实用技术》2003.8
- [27] 赵荣椿, 赵忠明等. 数字图像处理导论, 西北工业大学出版社, 1995 年 6 月
- [28] 沈海戈, 柯有安. 医学体数据三维可视化方法的分类与评价, 5(7):pp545-550, 2000
- [29] 李庆, 周曼丽, 柳健. 三维物体识别研究进展, 中国图像图形学报, 5(12):pp985-993, 2000
- [30] Charles Loop. *Smooth surface subdivision based on triangles*. University of Utah, departement of Mathematics. Master's thesis. 1987.
- [31] 邓白刚等, 一个新 VRML 浏览器的构造与实现《计算机工程》第 25 卷 12 期, 1999.12
- [32] 张正霞等, 虚拟现实建模语言 (VRML) 的概况与展望, 《工程图学学报》1998.2

致 谢

经过一年多的学习和工作，终于完成了毕业课题的开发任务和论文撰写工作。在此，我要感谢学业和科研过程中指导我，帮助我的老师们和同学们，没有他们关心和帮助，我是不可能完成整个课题的工作。

首先，感谢我的导师罗代升教授。在这三年里，我的点滴进步都与罗老师的悉心教导分不开。导师严谨的治学态度和乐观豁达的生活态度深深的熏陶和启迪着我。在学习、生活和工作中给予了我无私的关怀和帮助，并在我的毕业课题中给我悉心指导。在此致以诚挚的敬意和衷心的感谢！

感谢陶德元教授和何小海教授为我提供了课题和丰富的实验条件，在我的学习上和科研上给予了大量的指导，使我的科研能力得到了锻炼。

在课题研究过程中，张若文，雷荣及师兄王卫平同学给了我许多热情无私的帮助，在此表示深深的谢意。

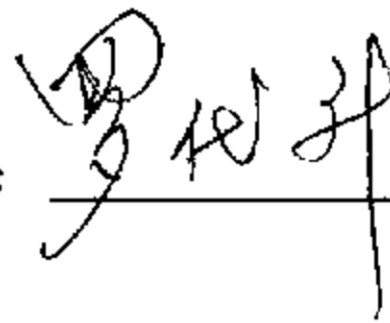
另外，滕奇志、吴小强、吴晓红、王正勇等老师在这些年里给了我很大的帮助，在此一并致谢。

声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得四川大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本学位论文成果是本人在四川大学读书期间在导师指导下取得的，论文成果归四川大学所有，特此声明。

指导教师：



学生：

