

# 相移法三维测量系统



## 重庆大学硕士学位论文 (学术学位)

学生姓名：潘玉玲

指导教师：王银峰 副教授

专    业：理论物理

学科门类：理    学

重庆大学物理学院

二〇一三年四月

# **A 3-D Shape Measurement System Based on Phase-shifting Method**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Master's Degree of Science

**By**  
**Pan Yuling**

**Supervised by Associate Prof. Wang Yinfeng**  
**Specialty: Theoretical Physics**

College of Physics of  
Chongqing University, Chongqing, China

April 2013

## 摘 要

物体的三维形貌特征是物体最重要、最基本的特征之一，也是比较、记录及复制物体的基础。因而，物体的三维形貌测量有着比较重要的意义。三维形貌测量在实际生活和工业生产中有着比较广泛且重要的应用，如：逆向工程、工业生产上的质量监控、机器人的视觉系统、刑事侦探和生物医学等等。实现三维测量的方法有很多，但光学测量方法与其它方法相比具有高精度、非接触、全场性且易于实现自动化等优势。

本文通过投射正弦光栅、采用四步相移法来获取所测物体的高度信息。首先，通过四步相移法的基本原理获得相位主值，即被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 之间的相位值。然后，在分析比较不同的相位解包裹方法后，采用了一种质量引导不连续路径的解包裹方法，通过此方法得到正确连续的相位值。最后，通过三维重建得到所测物体上各点的高度信息。对不同形状的物体进行测量，并对测量的相对误差和误差区域做了分析。由于仅由一个 CCD 相机采集到的图片可能存在阴影区域，导致表面高度变化过快的物体测量得到的三维数据不完整。因而，为了对误差区域做处理，采用双 CCD 相机进行图像采集。并根据人脸面具本身的特征采用了基于人脸特征的 $180^\circ$ 拼接方法，对不同视角测量后的三维数据进行拼接，最终有效地避免了阴影区域对高度测量的影响，且拼合区域过渡平滑、自然。

在分析理论的基础上，结合考虑测量精度和实际条件，设计了基于相移法的物体三维形貌测量系统，并通过了实验和 MATLAB 编程加以实现。对不同物体进行三维测量，对该系统进行试验。试验结果表明：本文设计的三维测量系统方法是有效可行的，对实验设备的要求也比较简单，且取得了较好的实验结果。

**关键词：**三维测量，正弦光栅，四步相移法，解包裹，三维面形拼接

## ABSTRACT

The three-dimensional shape characteristics of object is the one of the most important and fundamental characteristics of objects, which is also the basis for comparing, recoding and replicating objects. Therefore, the measurement of three-dimensional shape of object has important significance. Three-dimensional shape measurement has wide and important application in real life and industrial production, such as reverse engineering, quality monitoring in industrial production, visual system of robots, criminal detection and biomedicine. There are many ways to achieve three-dimensional shape measurement, however, as compared to other methods, optical measurement method has the advantages including high accuracy, non-contact, full-field, and liable to achieve automation.

Through projecting sinusoidal grating, this paper adopts 4-step phase-shifting method to acquire the height of object. Firstly, phase principal value shall be acquired via the basic principle of 4-step phase-shifting method, i.e. the phase value wrapped among  $[-\pi, +\pi]$ . Then, after analyzing and comparing different phase unwrapping methods, quality guide the non-continuous path was adopted to obtain the right and continuous phase value. Finally, the height of each point in the object was obtained by three-dimensional reconstruction. Moreover, objects of different shapes were measured, and the measured relative error and error area were analyzed. As the pictures collected by only one CCD camera may exist shadow area, resulting in that the three-dimensional data obtained by measuring the objects with rapid surface height change is not complete. Therefore, double CCD cameras were adopted to collect pictures for disposing the error area. Moreover, as per the characteristics of face mask, 180° mosaic method was adopted basing on the facial characteristics. This mosaic method was carried out to three-dimensional data measured from different visual angles, thus the influence of shadow area to height measurement was finally effectively avoided. Furthermore, the transition of mosaic area was smooth and natural.

On the basis of analyzing theory, and considering the measurement accuracy and practical condition, three-dimensional shape measurement system based on phase-shifting method was designed. And it was achieved via experiment and MATLAB programming. Moreover, three-dimensional measurement was carried out to different objects, and experiment was carried out to the system. The experiment result showed

that this three-dimensional shape measurement system designed by this paper is effective and feasible, and good experiment result is obtained.

**Key words:** 3D shape measurement ,sinusoidal grating,4-step phase-shifting method,phase unwrapping,3D image mosaic

## 目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 研究的背景及意义 .....	1
1.2 常用的光学三维测量方法简介 .....	1
1.2.1 飞行时间法 .....	3
1.2.2 激光三角法 .....	4
1.2.3 基于相位测量的方法 .....	5
1.3 研究现状发展趋势 .....	7
1.3.1 研究现状 .....	7
1.3.2 发展趋势 .....	8
1.4 本文研究的主要内容 .....	8
2 三维测量系统简介及系统的标定 .....	11
2.1 三维测量系统简介 .....	11
2.2 系统的标定 .....	12
2.2.1 系统标定的意义 .....	12
2.2.2 系统标定常用的方法简介 .....	12
2.2.3 系统标定实验 .....	13
3 四步相移法原理及图像采集.....	15
3.1 四步相移法的基本原理.....	15
3.2 图像采集 .....	16
4 相位展开技术.....	19
4.1 相位展开的意义 .....	19
4.2 常用的相位展开方法 .....	20
4.2.1 时间相位展开算法 .....	20
4.2.2 空域相位展开算法 .....	20
4.3 质量引导不连续路径解包裹方法及实验 .....	21
4.3.1 质量函数的选取 .....	22
4.3.2 解包裹的路径 .....	22
4.3.3 质量引导不连续路径解包裹方法的实验结果及分析.....	23
4.4 本章小结 .....	25

<b>5 三维实测结果及分析</b>	26
5.1 三维实测结果	26
5.2 结果分析	28
<b>6 三维面形的拼接</b>	30
6.1 三维面形常用拼接方法简介	30
6.1.1 数据的坐标变换	30
6.1.2 数据的融合	31
6.2 基于人脸特征的拼接方法	32
6.2.1 拼接区域的选择	32
6.2.2 拼接区域的数据处理	33
6.3 基于人脸特征的拼接方法的数据处理结果及分析讨论	34
6.3.1 基于人脸特征的拼接方法的数据处理结果	34
6.3.2 讨论	36
6.4 本章总结	36
<b>7 总结与展望</b>	38
7.1 总结	38
7.2 展望	39
<b>致    谢</b>	40
<b>参考文献</b>	41
<b>附    录</b>	44

## 1 绪 论

### 1.1 研究的背景及意义

人类生活在三维空间和一维时间的世界里，因而物体都具有三维空间特征。物体的三维形貌特征是物体最重要的特征之一，正确测量物体的三维形貌有着相当重要的意义，也是记录、比较、复制物体的基础。然而，传统的照相机、摄像机或者扫描仪只能得到所测物体的二维平面图像，损失了物体的高度信息，因而传统的测量方法不能再现真实的客观世界。

为了适应日益发展的工业生产和人们的生活需要，人们开始探索采用不同的方法来测量物体的三维形貌。测量的类型主要可以分为两类：接触式测量和非接触式测量。接触式测量虽然有着较高的测量精度（可以达到微米级）但也有着自身难以克服的缺陷，如：测量时会与被测物体发生挤压，可能会导致柔软物体表面发生形变，影响测量精度。并且接触式测量的逐点测量的方式极大的限制了测量的速度。接触式测量方法最典型的代表是三坐标机，三坐标机虽然有着较高的相对测量精度，但其测量速度慢、价格昂贵、易受环境影响、且对软质材料和带孔径的物体测量效果不理想等缺陷，使其不能满足高效率、大面型的测量。在非接触测量方式中，又包括了声学、电磁学和光学等测量方法，其中光学测量方法由于具有高效率、全场性、非接触、高精度和易于实现自动化等优势，已成为近年来研究的热点之一。在光学测量方法中，常用的有：飞行时间法、激光三角测量法、相移法、莫尔条纹法和傅里叶变换法等，但这些方法各有优势和缺陷。

三维测量技术在工业生产和人们的日常生活中有着广泛且重要的应用。如：机器人的视觉系统、工业生产上的质量监控、逆向工程（是一种对已有的样品或模型进行精确的三维测量获得三维数据，再将所获得的数据进行处理，并最终完成样品复制的过程。逆向工程可以大大的减少某些产品的开发设计的成本和周期）、刑事侦探、考古、生物医学的诊断等等<sup>[1-4]</sup>。随着三维测量技术的不断完善和发展，将会给工业生产和人们的日常生活带来更多的便捷和帮助。

### 1.2 常用的光学三维测量方法简介

随着 20 世纪 60 年代发明激光以后，光学计量有了迅速的发展<sup>[5]</sup>。随后，光学的物体三维形貌测量方法又成为光学计量的一个重要分支。近年来，由于光电子技术、计算机技术和光学的发展，光学三维测量方法已成为三维测量的一个重要部分。所谓光学的测量方法就是利用光学手段为基础，采用分析、比较、计算等方式来获取所测物体上每点所对应的高度信息。如图 1.1 所示为光学三维测量方



法的分类结构图。

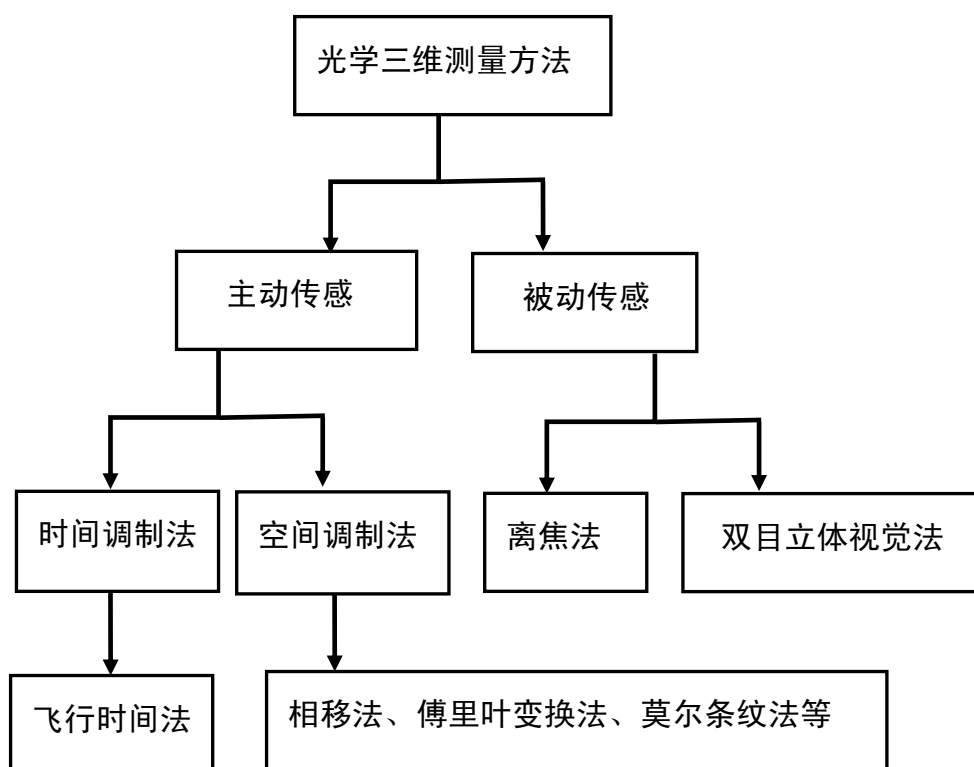


图 1.1 光学三维测量方法分类

Fig1.1 The classification of optical 3D measurement methods

光学三维测量方法根据测量方式不同可以分为：主动传感<sup>[6][7]</sup>和被动传感。主动传感区别于被动传感的主要方面是：需要投射结构光来进行三维测量。由于物体的三维特征会对结构光场的空间或者时间进行调制，因而得到的调制信息中包含了所测物体的高度信息，通过对调制的信息进行解调，就能得到物体上每一点的高度信息。空间调制和时间调制是对结构光调制的两种不同的方式，二者的主要区别在于对结构光调制获取信息的方式不同。在时间调制方法中的典型代表是飞行时间法。由于结构光场的光强值、对比度、相位等是结构光的重要信息。因而，可以通过某种手段对这些信息进行获取，再通过计算处理来获取高度信息，这种方法就是结构光的空间调制法。而根据结构光本身的结构的不同，又可以分为：点结构光法，是通过逐点扫描的方式来获取物体的三维轮廓特征的测量方法；线结构光法，也可以形象地称其为光条法或者光带法，就是将点结构光中的点光源用线状光源代替，采用一维扫描的方式来获取物体的高度信息；面结构光法，采用通过编码或者有一定规律的二维图案作为结构光来获取物体的高度信息的方法。

法。

被动三维传感则不需要结构光的投射，而是直接从一个或者多个摄像系统中来获取所测物体的高度信息，常用的被动式三维测量方法有双目立体视觉法和离焦法等。双目立体视觉是根据仿生学原理所设计的方法，从两个不同视角获取所测物体的二维图像，再根据双目立体视觉的原理，通过计算机对不同视角的二维图像进行处理来获得对应的三维信息。离焦法是 **pentland** 在 1987 年首先提出来的<sup>[8]</sup>，这种方法中，首先，由两幅离焦像得到的相对模糊度将被计算。所测物体的三维轮廓是通过光学系统的模糊参数和相对模糊度来确定的。被动三维测量方法的优势在于测量并不需要投射结构光、系统简单、数据采集较快，但其测量精度较低，不适用于高精度的精密测量，一般可用于对被测物体的识别和定性认识。因而，被动测量方法一般在机器人的视觉系统中有着广泛的应用。下面对几种常见的光学主动传感三维测量方法做简要介绍。

### 1.2.1 飞行时间法

在自然界中，某些动物的视觉系统就是采用的飞行时间的方法，如蝙蝠等。在很早以前，人们也知道通过计算闪电与雷声的时间差来判断雷电与人们之间的距离。飞行时间法的基本原理就是利用时间与距离之间的关系来获取测量物体的高度。

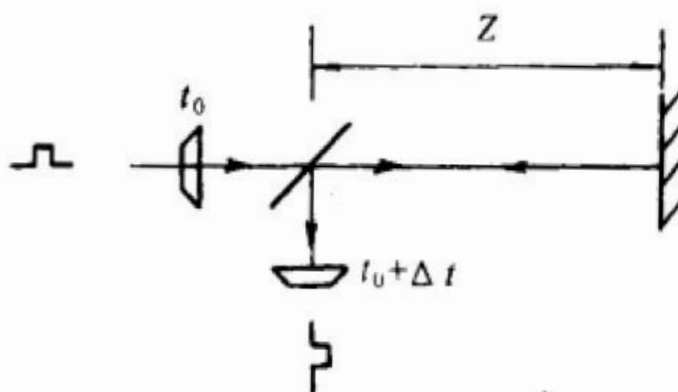


图 1.2 飞行时间法原理图

Fig.1.2 The principle of the time of flight

飞行时间法 (Time of flight, 简称 TOF), 是一种根据所测物体三维形貌对结构光的时间调制为基本测量原理的方法。飞行时间法的原理图如图 1.2 所示，由测量系统发射出来的光，到达物体表面后通过反射传回到接收装置。光脉冲从发出到接收之间会存在时间差，因而，可以通过检测时间差  $\Delta t$ ，计算出距离  $z$ 。再通过转

换  $z$  得到物体表面的高度信息。

由于光速达到  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，因而要达到一定的测量精度，则对测量系统的时间分辨率有着特别高的要求。因此，通常情况下飞行时间法的测量精度相对而言是较低的，通常在毫米级。飞行时间法的典型分辨率大概在 1 毫米左右；若采用亚皮秒脉冲信号和时间分辨率较高的信号接收系统，则测量的精度可以达到亚毫米级。若采用时间相干的单光子计数法，则高度（深度）测量的分辨率可以达到  $30 \mu\text{m}/\text{m}$ 。若利用超短光脉冲和数字重建与和利特罗装置相结合的方法，则测量的分辨率可以达到  $6.5 \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>。

由于飞行时间法采用的是采用的是反射的方式，因而测量不存在盲区和阴影。不需要对图像进行处理，测量过程相对简单，但很难达到较高的测量精度，对系统的时间分辨率要求极高，而且逐点扫描的方式导致了对所测物体的大小和测量时间的限制。

### 1.2.2 激光三角法

激光三角法<sup>[10,11]</sup>的基本原理是根据投射光源与接收元件之间的空间位置关系来确定所测物体的三维信息的。原理图如图 1.3 和 1.4<sup>[9]</sup>所示。

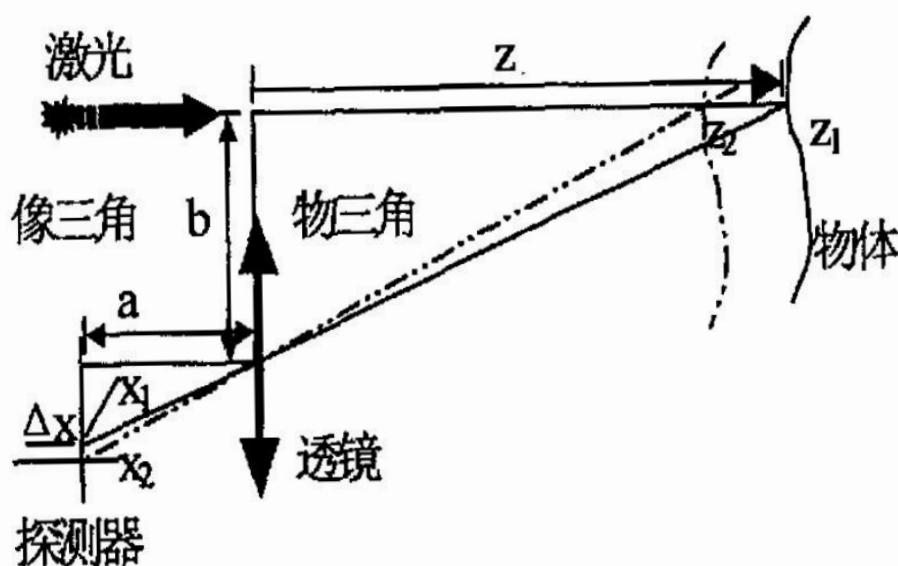


图 1.3 激光三角法原理图

Fig1.3 The principle of the laser triangulation method

如图 1.3 所示，由光源投射系统产生的激光沿着路径  $z$  到达所测物体的表面点  $z_1$ ，经过反射后，再经由透镜成像于探测器上的  $x_1$ 。当物体表面形状发生变化时，相同的光束到达物体表面的  $z_2$  点，再经由透镜到达探测器表面的  $x_2$  点。通过计算

可以得到点  $x_1$  和点  $x_2$  之间的距离差  $\Delta x$ ，再由三角原理，可以测得物体的高度信息。

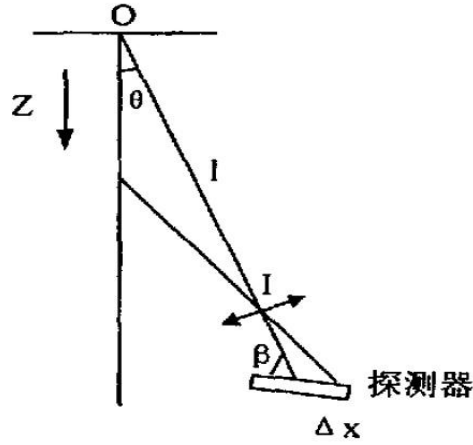


图 1.4 激光三角法的常用光路图

Fig1.4 Common beam path diagram of laser triangulation method

图 1.4 是激光三角法中常用的光路图。如图 1.4 所示，投影和成像光轴之间的夹角为  $\theta$ ，接收装置（即探测器）与成像光轴之间的夹角为  $\beta$ 。为了使被测物体上的所有点都能在探测器上成像而不产生离焦，则需要满足 *scheimpflug* 条件，也就是：

$$\tan \theta = K \tan \beta \quad (1.1)$$

上式中  $K$  为放大率，成像系统的焦距为  $f$ ，则由三角相似原理可得，物体某点的高度变化为：

$$Z = \frac{(OI - f) \Delta x \cdot \sin \beta}{f \sin \theta + \Delta x \cos \theta \sin \beta} \quad (1.2)$$

激光三角法的测量精度较高，可以达到 0.01mm，且扫描速度可以达到每秒数万点。但对设备的要求相对较高。

### 1.2.3 基于相位测量的方法

基于相位测量方法的基本原理是：当光栅投射到物体的表面时，相位会受到所测物体高度的调制。因而，可以通过获取相位的变化值，再通过相位值还原物体的高度信息。根据获取相位的方法的不同，又可以把基于相位测量的方法分为：莫尔条纹法、傅里叶变换法、移相法和次条纹积分法等。下面对比较常用的莫尔条纹法、傅里叶变换法和相移法做简单的介绍。

#### ①莫尔条纹法

莫尔条纹法是在 1970 年提出来的<sup>[12]</sup>，是最早的采用光栅投影来测量物体三维轮廓的方法。莫尔条纹法基于的原理是：采用基准光栅和一个投影到物体表面受

到物体高度调制的像栅进行叠合，形成莫尔条纹。再由获得的莫尔条纹绘制出等高线，最后通过等高线来获取物体的高度信息。目前提出的莫尔条纹法有：投影莫尔条纹法、阴影莫尔条纹法和扫描莫尔条纹法等。目前，相移莫尔条纹法的测量范围为 1mm-0.5m,测量的分辨率则可以达到 0.1-0.01 个条纹。

### ②傅里叶变换法

傅里叶变换法 (Fourier transform profilometry,简称 FTP)，是 M.Takeda 等人在 1983 年提出来的<sup>[13,14]</sup>。一般采用正弦光栅或者罗奇光栅投射到所测物体表面，由于投射的光栅会受到所测物体高度的调制，因而可以通过摄像系统获取放上物体后受到物体高度调制的变形条纹图，再通过傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换、相位解包裹等处理后，即可获得所测物体的三维信息。其实，傅里叶变换法就是将所获取的条纹图形从空域变换到频域，再对频域的信息进行滤波等处理，最后再通过傅里叶逆变换还原需要的相位信息。傅里叶变换法又可以分为有载波变换法和无载波变换法，下面对无载波的傅里叶变换法做简单介绍：

若投射的是正弦光栅，则光强的分布为式 (1.3) 所示，式中  $\phi(x, y)$  表示相位。则光强值可以表示为：

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y) \quad (1.3)$$

上式也可以表示为：

$$I(x, y) = A(x, y) + C(x, y) + C^*(x, y) \quad (1.4)$$

其中  $C(x, y) = 1/2 B(x, y) \exp[i\phi(x, y)]$ ，且  $C^*(x, y)$  为  $C(x, y)$  的复共轭。

对上式进行傅里叶变换可得：

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{A}(f_x, f_y) + \tilde{C}(f_x, f_y) + \tilde{C}^*(-f_x, -f_y) \quad (1.5)$$

由于  $I(x, y)$  是空域实函数，则其傅里叶变换在频域应满足 Hermitian 分布，即：

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{I}^*(-f_x, -f_y) \quad (1.6)$$

通过式 (1.6) 可得  $\tilde{C}(f_x, f_y)$  和  $\tilde{C}^*(-f_x, -f_y)$  携带的是相同的信息。通过滤波可以把  $\tilde{C}^*(-f_x, -f_y)$  和  $\tilde{A}(f_x, f_y)$  滤除。由  $\tilde{C}(f_x, f_y)$  可以得到相位分布，为：

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[C(x, y)]}{\text{Re}[C(x, y)]} \quad (1.7)$$

傅里叶变换测量方法相对而言比较简单和快速，因为只需要一帧或者两帧条纹图像就可以获得物体的三维数据，由于要采用滤波的方法，为了防止频谱的混叠，因而对所测曲面的高度梯度有一定的要求，而且傅里叶变换法对复杂物体的三维测量效果并不理想。

### ③相移法

相移法也叫相位测量轮廓术(简称 PMP),采用的是相移技术与正弦光栅投影相

结合的方法来测量物体的三维轮廓特征, 是根据放上物体后受到高度调制的相位与参考平面的相位相减得到相位差, 再通过相位差进行三维重建, 来得到所测物体的三维数据。

已经提出来的移相方法有很多, 如: 3 帧平均算法、Carre 法、次采样算法和 N 帧满周期等间距法等。在这些方法中, 比较常用的是 N 帧满周期等间距法。而在 N 帧满周期等间距法中, 四步相移法比较常用。四步相移法的测量原理将在本文的第三章中予以具体介绍。

若采用 N 步相移法进行计算, 则求得的相位值为:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{-\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2\pi n / N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2\pi n / N)} \quad (1.8)$$

相移法是这些基于相位测量方法中最成熟最可靠的一种<sup>[9]</sup>, 对测量设备的要求相对而言也比较简单, 而且有着较高的测量精度, 可以达到等效波长的几十分之一到几百分之一。但对正弦光栅的标准性和相移的准确度要求较高; 而且在测量过程中, 对于高度变化过快和具有复杂面形的物体的测量会存在遮挡和阴影等问题; 对于表面过于光滑的反光物体测量效果也并不理想; 由于在计算相位值时采用了反正切函数, 因而通过这种方法得到的相位值是被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 之间的, 因而要得到连续正确的相位值, 还需要对相位进行展开。这种方法需要对所测物体和参考平面的多幅图像进行采集, 因而很难完成实时测量。但相移法只要不受以上限制, 仍然是首选方案。

## 1.3 研究现状发展趋势

### 1.3.1 研究现状

目前, 三维测量技术在工业生产领域和人们的日常生活中已有着广泛的应用。许多国内外研究者也做了大量的工作和贡献, 在国外三维测量技术已经发展得比较成熟, 而且有很大一部分已经形成商品, 且在工业生产上的质量监控、生物医学、逆向工程等方面有着广泛的应用。

国内对三维测量的研究起步较晚, 但发展较快, 已经取得了丰硕的成果。如: 四川大学利用激光三角测量原理研制成的三维自动测量系统已在全国范围内推广应用。浙江大学研制成的一种新型检测器<sup>[15]</sup>, 实现了对细长管道内表面的检测, 测量误差在 0.1mm 以内。上海大学研制成功了基于条纹投影技术的光学三维传感与重建系统的逆向工程等。

自二十世纪八十年代以来, 光学三维测量技术已逐渐成为光学工程领域研究

的一个热点问题。但仍存在一定的局限性，如：效率较低、测量精度不够、不能完成实时测量等等。

### 1.3.2 发展趋势

为了满足更多实际应用的需要，未来的三维测量技术会朝着高速度、高精度，完成对复杂面形物体以及对某些反光物体或者是处于运动中的物体的实时测量的方向发展。因而，三维测量技术的研究热点和发展趋势主要会有以下几个方面：

#### ①多视角的高精度拼接技术

要完成对某些大型物体（如汽车等）和具有复杂形面的物体的测量，采用单一视角的测量结果不能完整的反应物体的三维信息。因而需要将多角度的测量结果通过坐标变换然后，再通过拼接得到所测物体的完整的三维数据。其内容主要涉及：传感器的标定、布局优化、高精度的拼接方法等。

#### ②相位展开问题

基于相位测量的条纹分析技术都会存在相位截断的现象。由于在计算相位主值时，用到了反正切函数，因而求解出来的相位值是被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 之间的，要获得正确连续的相位值则需要对包裹的相位进行解包裹，也就是相位展开。但在实际的计算过程中，可能由于所测物体表面本身的突起、深槽或者高度变化过快等原因，导致了采集到的图样存在阴影，为正确的进行相位展开带来较大的困难。在相位展开方法中，时间相位展开方法将成为研究的热点，时间相位展开算法能够避免物体本身的高度突变、断裂以及图像中的阴影区域等对解包裹造成的干扰，因而更具有优越性。且时间相位展开算法更易于实现实时测量。

#### ③图像处理技术

提高测量精度最直接的方法就是提高摄影系统的分辨率，但通过这种方法来提高精度是不经济的，并且通过这种方法精度提高的范围是有限的。而采用图像处理技术也可以提高测量系统的精度。如：通过处理获取图样的畸变和噪声，提高特征提取精度等。

#### ④测量系统的标定

为了保证测量的准确度和精度，需要对测量系统进行标定。测量系统的标定对测量精度的高低有着直接的影响。虽然人们对系统的标定已进行了大量的研究，但在一般情况下，系统标定需要满足一些约束的条件，会使得标定效果不理想或者使得标定中的计算比较复杂。

## 1.4 本文研究的主要内容

本文在分析理论和考虑实际的基础上，选择了四步相移法为三维测量的基本方法，设计并实现了基于相移法的三维测量系统，并根据三维测量的结果对测量

的相对误差和误差区域做了分析，并提出了解决的方案，即通过拼接可以避开误差区域且进行了试验。本文的三维测量系统对设备的要求较低，成本也较低，且测量较为准确，在实际应用中具有一定的可行性。本文中的测量数据处理流程图如下图所示：

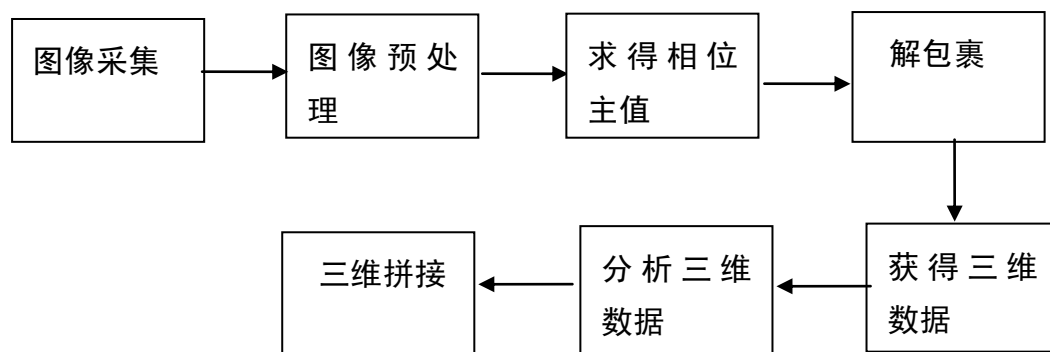


图 1.5 数据处理流程图

Fig1.5 The procedure of data processing

本文获得三维测量数据的主要步骤有：首先通过图像采集获取四步相移法中的关于测量物体和参考平面的八幅图片。然后对测量得到的图片进行图像预处理，对采集到的图片截取需要完成三维测量的部分，并对图像中的光强值信息进行提取。通过公式（3.4）求得相位主值。由于在求取相位主值的过程中用到了反正切函数，因而需要对相位主值进行解包裹处理，获得正确连续的相位值。将放上物体后的解包裹相位与参考平面的解包裹相位求得相位差，再通过（3.1）式获得高度数据。由于，从单一视角测量高度变化过快的物体时，采集到的光栅投影图片会存在阴影区域，导致测量的三维信息存在较大的误差区域。根据人脸的特征采用基于人脸特征的拼接方法，避免了误差区域，获得了较完整的三维测量数据。

本文一共分为七章对本文的方法、相关理论、实验及结果和结论等做了比较详细的介绍。每章主要内容如下：

在第一章中，叙述本课题的研究背景及意义；对常用的光学测量方法的测量原理做了简单介绍，并介绍了他们的优势和缺陷。在这些常用方法中，相移法具有对测量设备要求较简单且测量精度高的优势；对三维测量的研究现状和发展趋势做了分析，最后概括叙述了本文研究的主要内容。

在第二章中，首先介绍了本文的三维测量系统，接着说明了系统标定的意义及系统标定在三维测量中的必要性；对常用的标定方法的分类和基本原理做了简要介绍，最后简要介绍了本文相机标定的主要步骤。

在第三章中，介绍了四步相移法的基本原理。且对三维测量中，采集到的图



片做了展示。

在第四章中，首先介绍了解包裹技术在条纹分析三维测量方法中的重要意义；然后把常用的相位展开方法分为空域相位展开和时间相位展开进行了分类介绍，并对两类相位展开算法的优势和缺陷做了简要分析。最后，详细介绍了质量引导不连续路径解包裹方法的方法内容。并通过实验验证了该方法的可行性。

在本文的第五章，选用表面高度变化不同的物体（一个高度变化较快，另一个高度变化较为平缓）进行了三维测量，来对本文的三维测量系统进行试验。并对测量结果的相对误差以及误差区域做了分析。

在第六章中，首先对三维面形拼接方法的实际意义和拼接的主要步骤做了介绍。根据人脸的特征采用基于人脸特征的拼接方法，并对方法的具体内容做了详细介绍。该方法主要包括两个方面：拼接区域的选择和拼接区域数据的处理。最后采用该方法对存在较大三维测量误差的人脸面具进行处理，结果得到了较好的拼合效果。

第七章，是对全文内容的总结，并指出了对本文内容中可以改进的方面且对三维测量的发展方向提出了展望。

## 2 三维测量系统简介及系统的标定

### 2.1 三维测量系统简介

本文采用的三维测量系统主要包括两大方面：硬件系统和软件系统。硬件系统的构成如图 2.1 所示，主要由计算机、投影仪，左右两个 CCD 相机（由于本文后面涉及  $180^\circ$  拼接内容，所以选取双相机），三脚架和标定板所构成。左右相机到投影仪的距离相等，且位于投影仪的两侧。三角架起固定的作用，并可以调整测量的高度。软件系统主要由 MATLAB 编写的程序所构成。下面对投影仪和相机的参数做简要介绍。



图 2.1 投影及图像采集系统

Fig2.1 The system of projector and image acquisition

#### （1）投影仪

投影仪的参数主要由亮度、对比度、输出分辨率等所构成。本文从实用性和经济性的角度考虑，选用的是 sony VPL-CX71 型投影仪，该投影仪采用的是 RGB 液晶投影系统，分辨率为： $1280 \times 1024$ 。

#### （2）相机

选择相机主要考虑以下几个参数：分辨率、灵敏度等。本文采用的相机像素为 500 万，快门速度为 60ms。

## 2.2 系统的标定

### 2.2.1 系统标定的意义

在大部分的光学三维测量方法中，所测物体的三维信息都是从摄像系统所采集的图片中得到的。因此，要完成测量，建立摄像系统中图像的像素点和空间对应某物点之间的关系有着相当重要的作用。这种对应关系是由摄像机的参数和摄像系统的成像模型决定的。摄像系统的有些参数是要靠实验和计算来确定的，如：光心、光轴、焦距等。在测量之前，以测量摄像系统参数为目的的这种实验和计算，叫做摄像系统的标定。系统的标定是光学测量最基本、也是最重要的步骤之一。对多数摄像系统来说，物距是焦距的十几倍、上百倍、或者是成千上万倍，因而系统参数的一个微小误差可能会被放大至数倍。因而，系统的标定是一项比较精细、复杂的工作。虽然已有很多比较成熟的方法提出，但要完成针对于各种不同条件和不同对象的高精度标定，还需要进一步的研究和发展。系统标定的好坏直接决定了测量的精度。

### 2.2.2 系统标定常用的方法简介

目前，研究者们根据实际应用的需要已经提出了各种不同的标定方法。这些标定方法根据类型大致可以分为三类：传统标定法、基于主动视觉标定方法和自标定法<sup>[16]</sup>，也有许多研究者把基于主动视觉的标定方法归纳入自标定方法中。

#### ①传统标定方法

传统的标定方法是一种利用场景信息进行标定的方法。主要包括：直接线性变换法、直接非线性优化法和两步法。这三种方法中，目前使用最广泛的是两步法。直接线性变换法最早是由 Abdel 和 Karara 提出来的<sup>[17]</sup>，是直接通过求解线性方程而获取相机参数的方法。这种方法只需要对线性方程进行求解，方法和求解过程相对而言比较简单，但并没有考虑摄像系统摄像过程中的非线性畸变的问题，因而标定的精度较低。

直接非线性优化法是采用摄像系统所得到的二维图像的点与实际物点之间的关系是非线性的基本原理，采用非线性优化来获取相机的参数。这种方法对初始值的精度要求较高，由于采用完全非线性进行迭代运算，因而计算量较大，而且算法本身并不稳定。

两步法最先是由 Tsai<sup>[18]</sup>提出来的，这种方法首先采用直接线性变换法求解得到外参数和焦距，然后采用迭代算法求解像差系数。Tsai 提出来的方法中只包含了对轴对称相差的修正。而后来 Weng 提出了更全面的修正模型，在 Tsai 的基础上，还包含了对非轴对称的修正。两步法不仅有着较快的运算速度，而且有着较高的测量精度，运算量并不复杂。因而是目前采用最广泛的方法之一。

#### ②相机自标定方法

自标定的概念最早是由 Faugeras 等人在 20 世纪 90 年代提出来的。这种思想的提出,使得系统标定在一般情形下得以实现<sup>[19-21]</sup>,如:场景未知,相机任意运动等。相机自标定方法与传统标定方法相比,不需要再采用控制点和控制线,而是采用多次成像之间的关系来确定和计算摄像系统的相机参数的。多次成像之间的约束关系应该满足 Kruppa 方程,但是直接求解 Kruppa 方程是比较困难的。因而,后来又有研究者提出了分层逐步标定的思想。其中具有代表性的有:模约束法、绝对二次曲面法、QR 分解法等。

基于主动视觉的标定方法需要控制相机做某些可控运动,再利用这些运动的特殊性来计算相机的参数<sup>[22-24]</sup>,这些运动可能是绕光心的旋转或者是纯平移运动等。在机器人的手眼标定、头眼标定中会较多的运用到基于主动视觉的标定方法,因为在这些标定中相机的运动是可以控制的。

### 2.2.3 系统标定实验

本文采用以下方法对测量的相机进行标定,标定和操作的主要步骤如下:

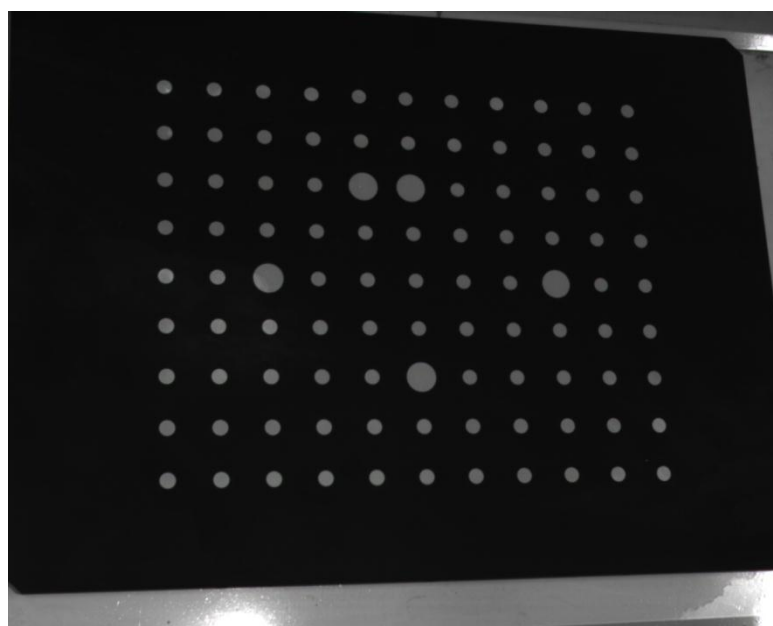


图 2.2 标定模板图

Fig2.2 Calibration gauge

①首先建立平面的点状网格的标定模板,标定模板上存在一些坐标值已知的点,这些点作为标定的控制点。这些点的坐标值为标定过程中世界坐标系的坐标值。本文采用的标定模板,如图 2.2 所示。

②旋转标定模板,使相机能从不同的角度拍摄到完整的模板,得到不同角度的标定模板图。

- ③对得到的标定模板图进行图像分析和处理，通过检测找到模板上的控制点，并获取这些控制点在图像中的坐标。
- ④根据得到的控制点的图像坐标和世界坐标之间的对应关系求得标定中所要求解的参数。

### 3 四步相移法原理及图像采集

#### 3.1 四步相移法的基本原理

四步相移法原理图如图 3.1 所示。整个测量系统由光栅投射系统，CCD 相机和参考平面所组成。相机中心到投影系统中心的距离为  $d$ ，且相机与投射系统的连线与参考平面平行，相机到参考平面的距离为  $L$ 。由投射系统投射正弦光栅，某光束  $P_1$  与参考平面交于 A 点。当放上物体后，由于受到了高度的调制，由 CCD 相机看到的该光束被移到了 C 点。

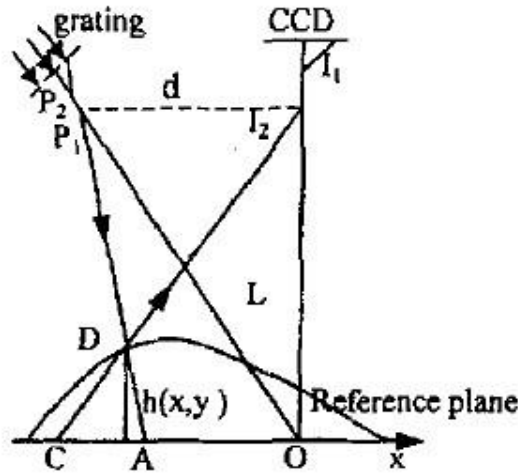


图 3.1 相位测量轮廓术原理图

Fig.3.1 The principle of PMP

若设物体上 D 点的高度为  $h$ ，则由三角原理可得：

$$h = \frac{LT\Delta\phi}{2\pi d + T\Delta\phi} \quad (3.1)$$

上式中的  $L$  和  $d$  是通过实验可以测得的数据， $T$  是投射光栅的周期。因而高度测量的关键问题转化成了放上物体后与参考平面的相位差的测量。由于正弦光栅投射到漫反射物体表面后，CCD 相机获取的变形栅像可以表示为：

每幅图像  $I(x, y) = R(x, y)[A(x, y) + B(x, y)\cos\phi(x, y)] \quad (3.2)$

式中  $R(x, y)$  表示所测物体表面的不均匀反射率， $A(x, y)$  是背景强度， $B(x, y)/A(x, y)$  表示的是光栅条纹的对比度。 $\phi(x, y)$  是相位值。由于上式中有多个未知数，直接获取相位值是比较困难的。采用移相的方法则可以比较准确的获取相位值。在四步相移法中，每次移动光栅周期的  $1/4$ ，因而相移量为  $\pi/2$ 。则采集

到的对应的四帧条纹图分别为：

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) - B(x, y) \sin \phi(x, y)] \\ I_3(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) - B(x, y) \cos \phi(x, y)] \\ I_4(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) + B(x, y) \sin \phi(x, y)] \end{aligned} \quad (3.3)$$

联立以上四个方程，可以得到相位  $\phi(x, y)$ ：

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (3.4)$$

式 (3.1) 中的  $\Delta\phi$  值由所测物体的相位值减去参考平面的相位值得到，因而，需要通过四步相移法分别测得放上物体后和参考光栅的相位值，然后求得二者之差，再代入 (3.1) 式中，就可以求得高度值。

### 3.2 图像采集

在本章中，使用的是图 2.1 所示的测量系统中的左相机进行的光栅图像采集。由于采用的是四步相移法的基本原理进行的三维测量。由 (3.3) 式可知，要获取所测物体和参考平面的相位值，需要对正弦光栅相移量分别为  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  的八幅图像进行采集。本文选用的是对表面高度变化不同的人脸面具和面具猴进行三维测量，来进行模拟实验的。下面对采集到的图像进行展示。

每条光栅有唯一的相位值。

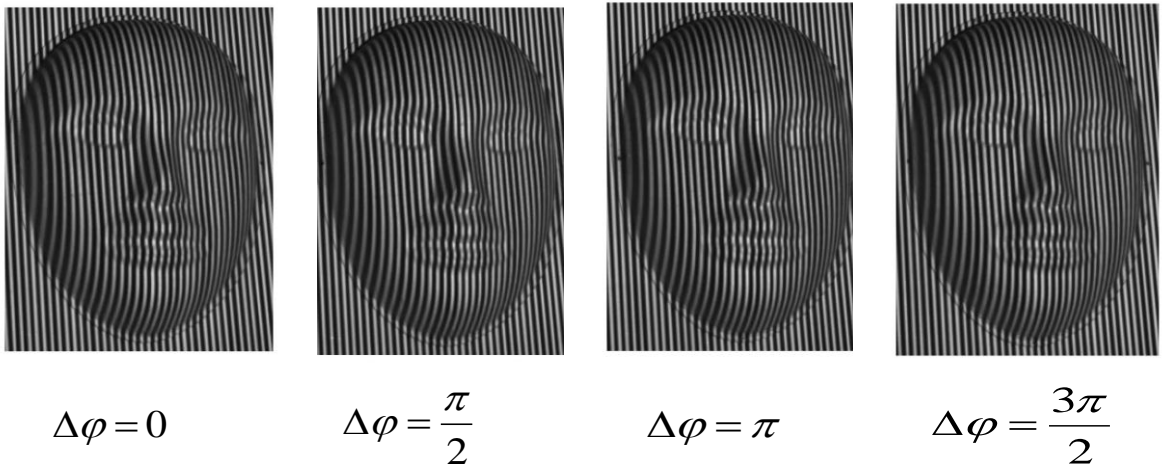


图 3.2 人脸面具的光栅调制图

Fig3.2 the image projected to the surface of the face mask by sinusoidal grating

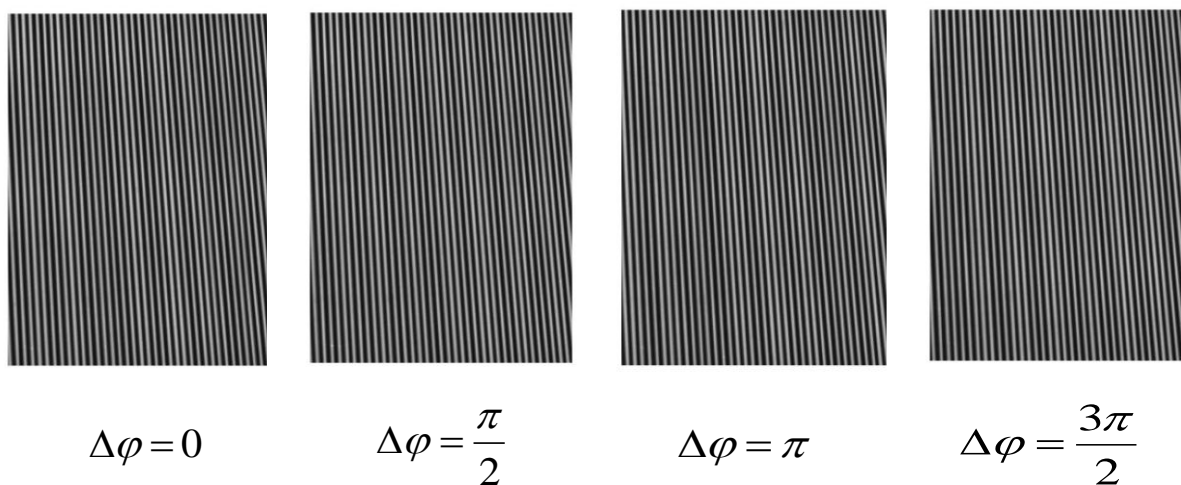


图 3.3 光栅投射到参考平面图像

Fig3.3 The image projected to the surface of the reference plane by sinusoidal grating

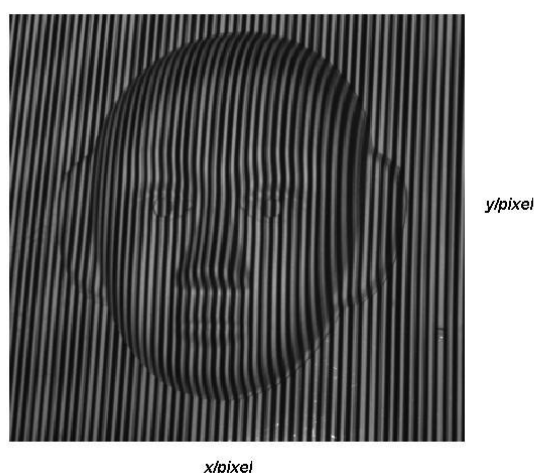


图 3.4 面具猴光栅调制图

Fig3.4 The image projected to the surface of the monkey mask by sinusoidal grating

如图 3.2 和 3.3 所示，为正弦光栅相移量分别为  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  时，光栅分别投射到人脸面具和参考平面上的图像。由图 3.2 可以看到，当正弦光栅投射到人脸面具上时由于受到人脸面具高度的调制而发生了扭曲变形。因而这些变形光栅的图片是携带了物体的高度信息的，通过对这些携带物体高度信息图片的处理，可以获取物体的三维信息。图 3.4 是以正弦光栅相移量为  $\frac{\pi}{2}$  为例，面具猴调制光栅的图像。



虽然可以通过对这些图片进行处理来获取相位值，再代入（3.1）式中就可以获取高度值。但由（3.4）式可知，由于在该式中求取相位值时用到了反正切函数，因而求得的相位值是被截断的。要获得正确的相位值信息还需要对截断的相位值进行相位展开。最后把正确的相位差值代入（3.1）式中，求得高度值。具体的解包裹方法将在第四章中予以具体介绍。

## 4 相位展开技术

### 4.1 相位展开的意义

相位展开技术已经成为目前光学三维测量的研究热点之一。如第一章和第三章所介绍，采用相移法和傅里叶变换法时由于使用了反正切函数，因而得到的相位值是被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 之间<sup>[25]</sup>的。示意图如下图所示：

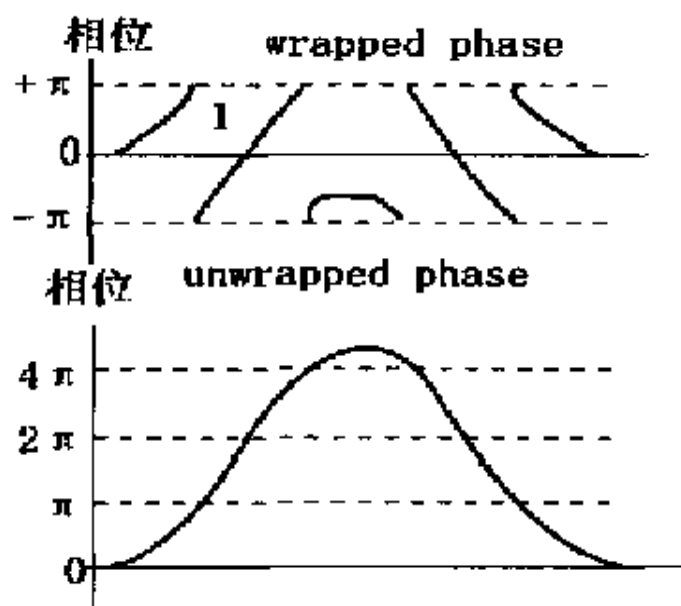


图 4.1 相位解包裹示意图

Fig4.1 Phase unwrapping

如图 4.1 所示，位于上面的图表示的是被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 之间的相位主值，而连续正确的相位值如 4.1 下面这幅图所示。因而真实的相位值和被包裹的相位主值之间是相差 $2n\pi$ 的，其中  $n$  为整数。相位展开也可以称之其为解包裹。解包裹的目的就是为了正确的求出每一点所对应的正确的  $n$  值，从而还原真实相位。如果用  $\phi_r$  表示实的相位值，用  $\phi_0$  表示相位主值即被包裹的相位值，那么它们二者之间应该满足如下的关系式，其中  $n$  为整数：

$$\phi_r = \phi_0 + 2n\pi \quad \text{关键在于求解} n \text{ 的值} \quad (4.1)$$

相位展开问题看似一个简单的问题，但在解决实际问题时往往会面临许多的困难。相位解包裹算法通常采用某点与相邻像素点的相位值相比较的方法，即空域相位展开算法。真实相位中，连续的相邻两点的相位差的绝对值应该是小于 $2\pi$ 的。因而，人们通常采取加减 $2n\pi$ 的方法来进行相位展开。然而，当实际情况面临

所测物体本身有较大的突起、断层、高度变化过快，又或者是采集到的图像本身存在阴影区域时，提出的算法很难继续正确有效的进行解包裹。

解包裹是采用相位法进行三维测量中比较重要且关键的一个步骤，在基于相位测量方法中，若不能对相位主值进行正确的解包裹就不能得到正确的高度信息。进行的三维测量也是无意义的。

## 4.2 常用的相位展开方法

目前，已经提出了多种相对成熟的相位展开算法。对相位展开算法的研究已成为当今采用条纹分析法中最重要、最活跃的领域。但这些相位展开算法根据性质来分大致可以分为两类：空域相位展开算法和时间相位展开算法。这两类算法在相位展开基于的方式上有着本质的区别。下面对这两类算法做简要的介绍：

### 4.2.1 时间相位展开算法

时间相位展开算法最早是由 Huntley 和 Saldner 提出来的<sup>[26,27]</sup>。时间相位展开算法是采用结构光三维测量中的一种。它的基本思路是：使投射光栅的频率随着时间发生变化，然后通过摄影系统采集这些图像，这些图像可以视为在一个时间轴上的序列。因而可以对图像中的每一个点的相位按照时间轴进行展开。时间相位展开算法与空域相位展开有着本质的区别。在时间相位展开算法中，图像中的每个像素点可以沿着时间的路径独立的进行相位展开，而不需要在二维图像中寻找路径。因而，这种方法可以完全避免图像中的噪点等对相位展开的影响，也可以避免空域相位展开中的误差传播，同时这种方法还可以测量本身高度变化比较大或者有断裂的物体。目前提出来的时间相位展开算法有：线性相位展开、线性拟合时间相位展开、拟合指数时间相位展开、傅里叶变换修正方法等。时间相位展开算法相对于空域相位展开算法而言，需要按照时间的序列投射不同频率的光栅，且要对多幅图像进行采集处理，计算过程相对而言比较复杂。但这种算法能够自动避免噪声等的干扰，能完成对各种具有复杂形面的物体的相位展开，具有巨大的潜力，已成为光学三维测量的研究热点之一。

### 4.2.2 空域相位展开算法

空域相位展开算法是基于一幅相位主值图进行相位展开的算法。这种算法相对而言比较简单。目前，空域相位展开算法已经提出了多种不同的算法，根据算法的类型大致可以分为：全局法、区域分割法和路径跟踪法等<sup>[28]</sup>。

#### ①全局法

根据全局法的原理提出来的解包裹方法有很多，如：元胞自动机法、神经网络法和最小二乘法等。其中，最小二乘法是近年来全局法中探讨和研究最多的方法，是全局法中的研究热点。最小二乘法是直接采用最小二乘法的计算原理对真

实相位进行求解的方法。原始的最小二乘法解包裹方法很容易受到图像噪声和物体本身孔洞、断裂、高度突变等的影响。后来，人们对最小二乘法进一步的进行了改进，提出了加权最小二乘法等方法。但总的而言一般全局法的计算量较大。

### ②区域分割法

区域分割法一般采用把图像分割成多个区域，对每一个区域进行独立的解包裹运算。不同区域之间解包裹的方法是按照较小的区域以较大的区域为准来进行解包裹的。区域分割法较全局法而言，可以减小解包裹过程中的计算量。

### ③路径跟踪法

路径跟踪算法根据类型分类也可以分为三类,即：路径决定法、残留补偿法和质量引导路径法。其中比较常用的有枝切法和质量引导路径法。

枝切法最早是由 Goldstein 等在 1988 年提出来的。该算法的主要步骤为：先确定图像中的残数，并标注出残数的正负号，然后用枝切线把这些残数连接起来并计算残数值之和，当残数值之和等于零，则该树枝生长完成。然后再重复以上步骤生成另一个树枝，直到所有残点被搜索完毕。这些线最后连接起来应成树枝状，而不是相互交叉的，因而形象地称之其为枝切法。

在枝切法中，枝切线的连接方式并不唯一，而且算法本身很难确定哪一种连接方式是最佳的方式，这给算法的本身带来了一定的困难。后来人们引入了质量引导路径的方法。

在质量引导路径解包裹方法中，不需要事先确定和识别残数点。而是根据某一准则对图像中每一个像素点的质量高低进行标识，然后以质量为标准进行解包裹处理。通常具体步骤为：先以质量最高的像素点（也可以称为种子点）为起点，对其相邻的像素点进行解包裹处理。然后，再从剩余点中选取质量值最高的点，重复前面的步骤，直到全场相位都被解包裹。在质量引导路径解包裹方法中，通常需要确定两个方面：质量函数的选取和具体解包裹路径的选择。

融合：格雷码 + 相移的方法

## 4.3 质量引导不连续路径解包裹方法及实验

本文采用一种质量引导不连续路径<sup>[29]</sup>的解包裹方法对获得的相位主值进行处理，并在算法上做了一定的改进。这种方法既采用了质量引导路径解包裹方法的基本原理，在具体解包裹过程中又用到了区域分割法中不同区域之间解包裹的准则是按照较小的区域以较大的区域为准来进行解包裹的基本思路。这种方法的算法相对而言较简单，而且通过该方法所获取的实验结果也较为理想，该方法是一种高效健壮的解包裹方法。该方法主要包括两个部分：质量函数的选取和解包裹路径的确定。具体方法如下：

### 4.3.1 质量函数的选取

图像中, 某个像素点与其相邻像素点相位值的二阶差分能够反映该像素点和周围相邻像素点相位值的凹凸变化关系, 因而, 可以选择二阶差分为解包裹的质量函数。

若某一像素点的位置坐标为  $(m,n)$ , 那么它的两个横向相邻点的坐标可表示为:  $(m-1,n)$  和  $(m+1,n)$ ; 两个相邻的纵向坐标分别为:  $(m,n-1)$  和  $(m,n+1)$ ; 相邻的对角线上的坐标为:  $(m-1,n-1)$ ,  $(m+1,n+1)$  和  $(m+1,n-1)$ ,  $(m-1,n+1)$ 。那么点  $(m,n)$  的横向、纵向和两个斜向的二阶差分值分别可以表示为:

$$\begin{aligned} D_1 &= F[\varphi(m-1,n) - \varphi(m,n)] - F[\varphi(m,n) - \varphi(m+1,n)] \\ D_2 &= F[\varphi(m,n-1) - \varphi(m,n)] - F[\varphi(m,n) - \varphi(m,n+1)] \\ D_3 &= F[\varphi(m-1,n-1) - \varphi(m,n)] - F[\varphi(m,n) - \varphi(m+1,n+1)] \\ D_4 &= F[\varphi(m-1,n+1) - \varphi(m,n)] - F[\varphi(m,n) - \varphi(m+1,n-1)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

那么点  $(m,n)$  的二阶差分值可以表示为:

$$D(m,n) = (D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + D_4^2)^{1/2} \quad (4.3)$$

在 (4.2) 式中  $F$  表示的是使相邻相位连续, 而加减  $2n\pi$  的操作。由于二阶差分函数的意义是表示凹凸变化。因而, 二阶差分值越大, 该点的质量应该越差。则将质量函数  $Q(m,n)$  定义为:

$$Q(m,n) = \frac{1}{D(m,n)} \quad (4.4)$$

质量函数能够定义图像中除边缘以外的所有的像素点, 由于图像边缘的像素点一般可靠性不高, 我们一般把这些点放在最后进行解包裹处理, 因而, 我们可以人为的把这些边缘点的质量值定义为 0。

### 4.3.2 解包裹的路径

每个像素点都包含有两个水平相邻像素点和两个垂直相邻像素点。把某像素点和相邻像素点的质量值之和叫做质量组合, 质量组合示意图如图 3.2 所示。解包裹的路径就是按照质量组合的大小逐一进行展开的, 因而解包裹的路径是不连续的。质量组合值较大的像素点先解包裹, 质量组合值较小的点后解包裹, 并对已经解包裹的像素点进行分组。在解包裹的过程中有以下三种情况:

- ①具有相同质量组合两个像素点都未进行解包裹操作, 则比较两个点的质量值的大小, 质量值较小的点以质量值较大的点为准加减  $2n\pi$ , 完成解包裹处理, 并将两个点纳入单独的一个组群。
- ②两个像素点中, 其中一个已经经过了解包裹处理且已属于某一个组群, 则把另

外一个像素点以这个像素点为参照进行解包裹，在解包裹后再纳入这个组群中。

③搜寻到的两个像素点都已经被解包裹，但是属于不同的组。则需要统计出这两个组中包含像素点的多少。包含像素点较少的组以包含像素点较多的点为准，进行加减  $2n\pi$  的操作。以保证相邻像素点的相位值连续。

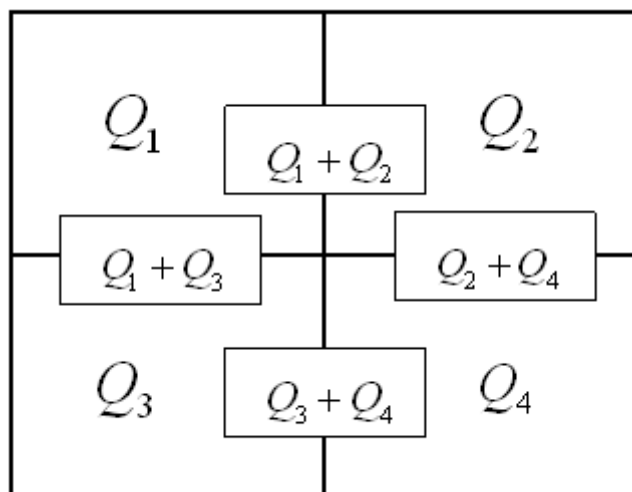


图 4.2 质量组合示意图

Fig4.2 Quality combination

质量引导不连续路径解包裹方法的步骤，主要包含以下几步：

- ①根据质量函数的定义，即（4.4）式，计算图像中每个像素点的质量值；
- ②构建质量组合模型，并根据质量值计算相应的质量组合值；
- ③根据质量组合值由高到低的顺序进行解包裹处理，并根据前面提到的解包裹过程中的三种情况对其进行分类处理；
- ④不断重复第③步直到全场的像素点都被解包裹。

### 4.3.3 质量引导不连续路径解包裹方法的实验结果及分析

采用质量引导不连续路径的基本方法原理，采用 MATLAB 编程实现该算法。并选用人脸面具的包裹相位图为例，进行试验，试验结果如图所示：

如图 4.3 所示，采用质量引导不连续路径解包裹方法，对大小为  $200 \times 270$  像素的参考平面的包裹相位和放上人脸面具后受到物体高度调制的变形光栅的包裹相位进行解包裹。图（a）、（b）分别表示参考平面包裹相位图，和放上人脸面具后受到物体高度调制的包裹相位图。图（a）、（b）相位解包裹后的图像分别如图（c）、（d）所示。由图（c）、（d）可以看到，采用该方法进行解包裹后，相位信息不再是被截断的，而是成连续分布的状态。图（e）表示的是由解包裹后的人脸面具和参考平面的相位差图。由于采用的是人脸面具的高度信息进行的光栅调制，因而，从图（e）可以看出，解包裹后的相位差能够正确反映放上物体后的相位差的变化。

这些包裹相位图，采用所编写的 MATLAB 程序在 MATLAB2012 中运行解包裹的时间约为 15S。

因而，从实验可以看出，质量引导不连续路径解包裹方法在实际应用中是具有一定的可行性的。

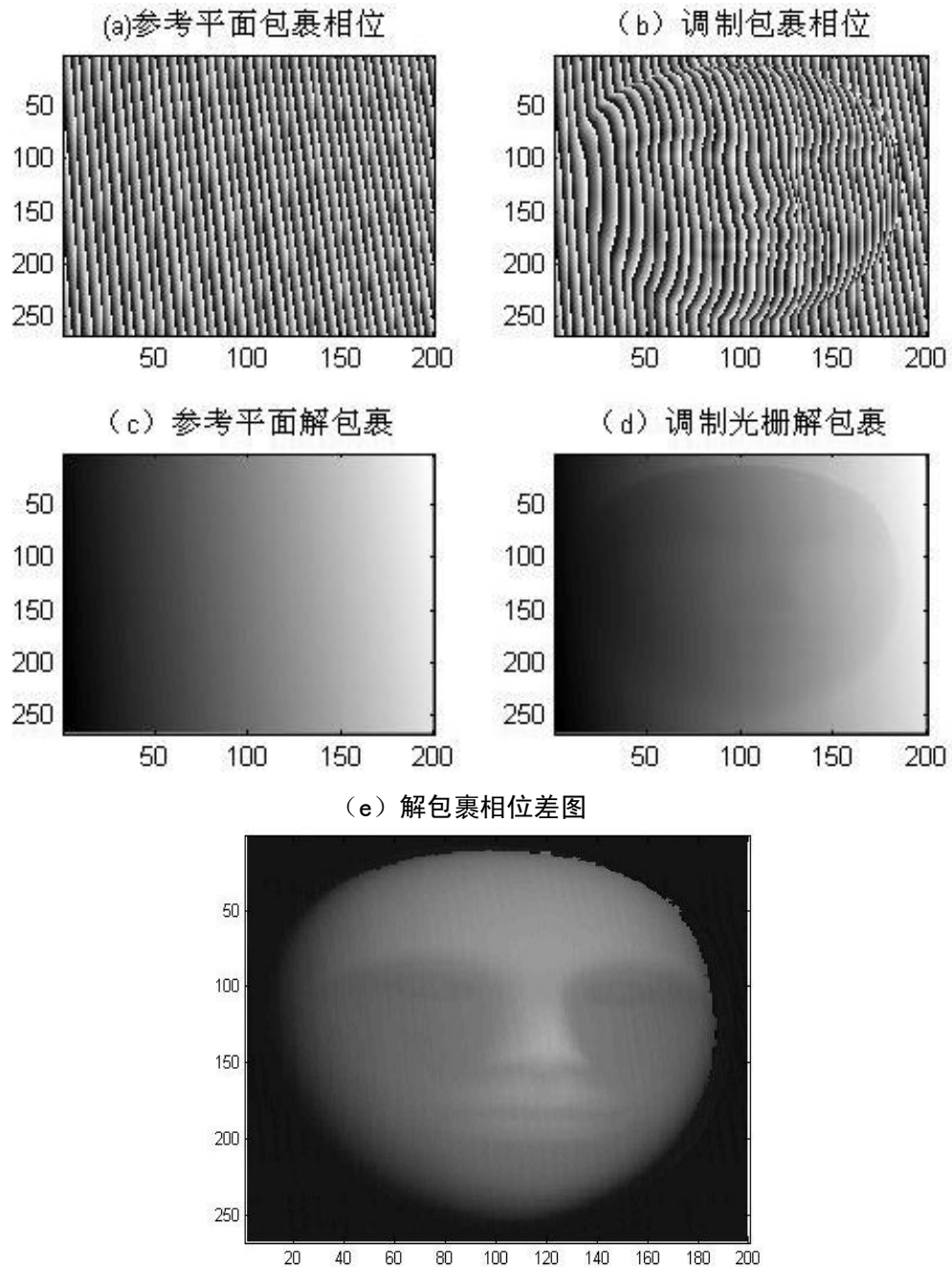


图 4.3 相位解包裹图

Fig4.3 Phase unwrapping image

- (a)The wrapped phase of reference plane    (b) The wrapped phase of object  
 (c)The image of reference plane after phase unwrapping    (d)The image of object after phase unwrapping  
 (e)The difference between (c)and(d)

#### 4.4 本章小结

相位解包裹在条纹分析法三维测量中有着重要的意义。在条纹分析法中，不能正确的解包裹就不能完成三维测量。目前常用的解包裹方法主要可以分为两大类：时间相位展开和空域相位展开（相位展开也叫解包裹）。并对这两大类相位展开方法的算法原理以及优势和缺点做了简要介绍。详细介绍了质量引导不连续路径解包裹方法的基本原理并通过 **MATLAB** 编程实现了该算法，以人脸面具和参考平面的包裹相位为例，验证了此方法的可行性。



## 5 三维实测结果及分析

### 5.1 三维实测结果

通过四步相移法和质量引导不连续路径解包裹的方法原理以及 MATLAB 编程和硬件系统实现了本文的相移法三维测量系统。分别选取两个高度变化不同的物体进行测量，对该系统进行试验。测量的物体一个是人脸面具，一个是面具猴。面具猴表面的高度变化较为平缓，而人脸面具在脸部边沿部分高度变化较快。在测量中，第三章 (3.1) 式中的  $d$ ，即相机到投影仪之间的距离为 155mm（在本章中选取的是测量仪器中的左相机进行测量），式中的  $L$ ，即相机和投影仪到参考平面之间的距离为 660mm。光栅周期为 80，单位为像素。测量所得的三维数据的三维效果显示图如下面的图所示。

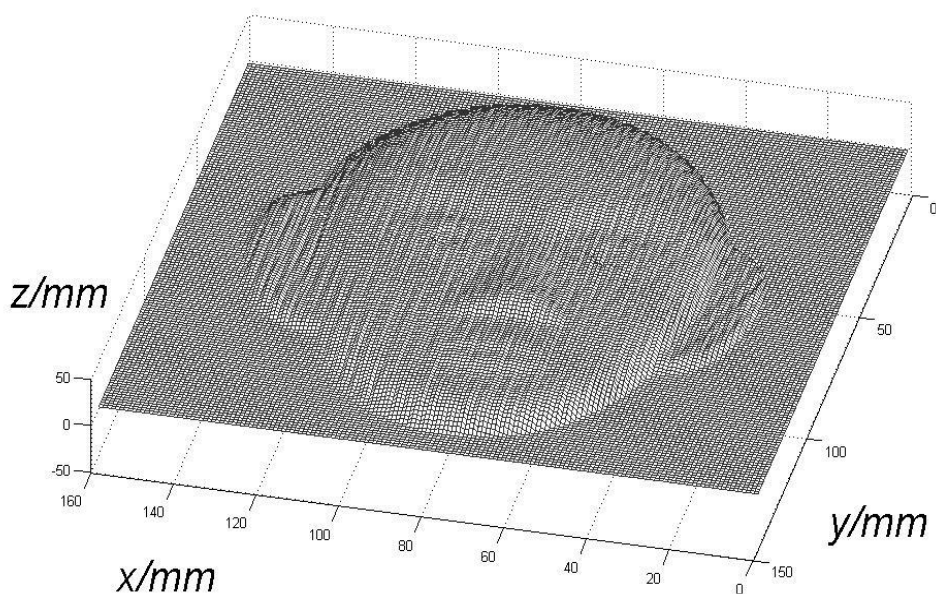


图 5.1 面具猴三维实测结果

Fig5.1 The 3D measurement result of monkey mask

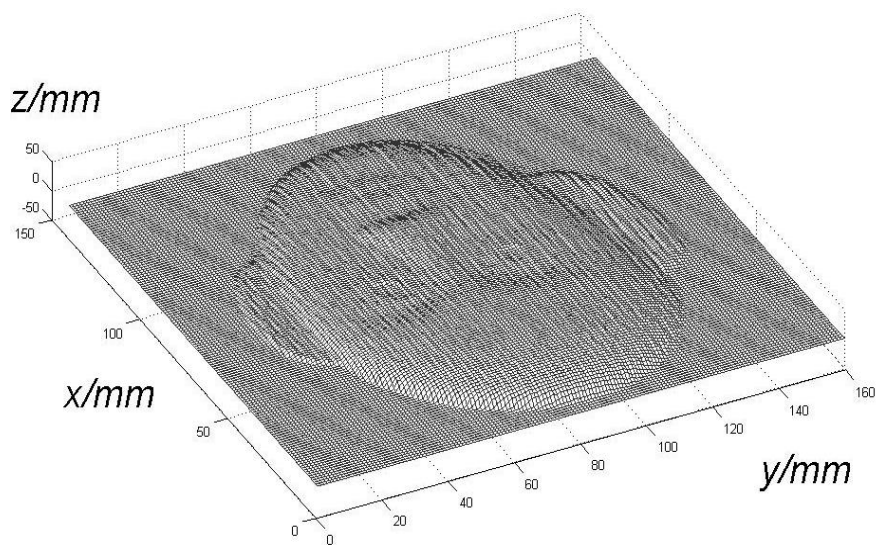


图 5.2 另一视角的面具猴三维实测结果

Fig5.2 The 3D measurement result of monkey mask from another angle of view

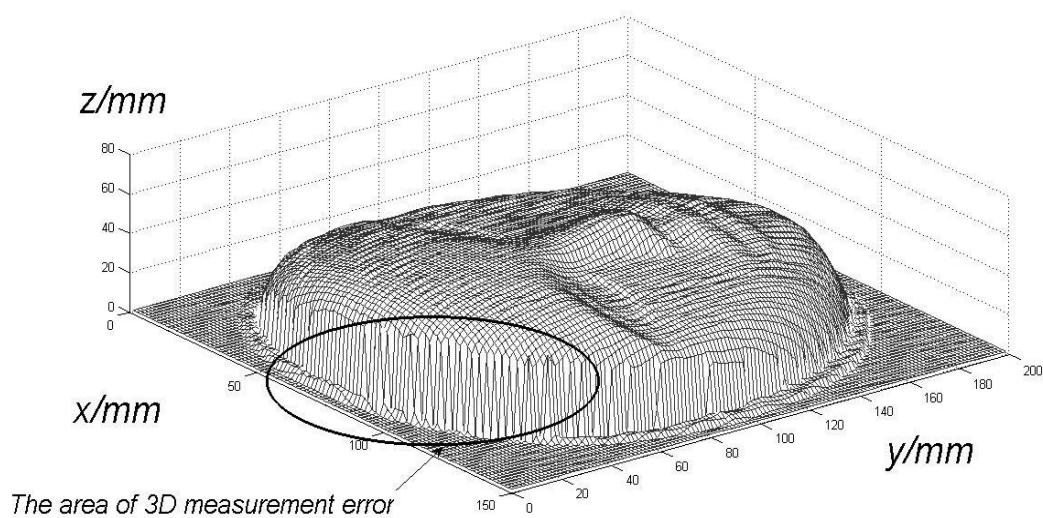


图 5.3 人脸面具三维实测结果

Fig5.3 The 3D measurement result of the face mask

表 5.1 测量数据与实际数据比较

Table5.1 Comparison between measured data and actual data

测量部位	三维测量值	实际值
人脸面具鼻尖高度	68.65mm	68.00mm
面具猴鼻尖高度	26.33mm	26.00mm

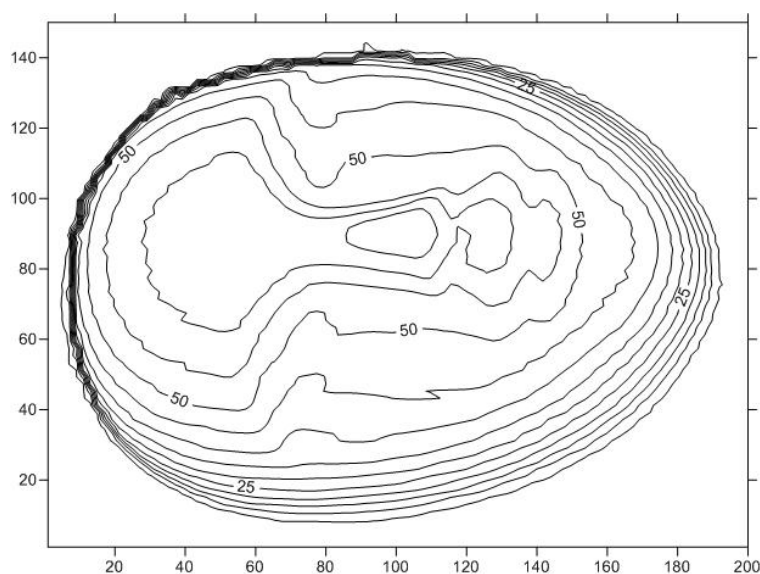


图 5.4 人脸面具等高图

Fig5.4 The contour map of face mask

图 5.1 和 5.2 是从不同角度看的面具猴的三维数据实测结果的三维立体显示图，图 5.3 是人脸面具的三维实测结果。以人脸面具和面具猴的最高高度（也就是鼻尖高度）为例进行三维测量的误差分析。具体数据，如表 5.1 所示，实物人脸面具鼻尖的高度为 68mm，测量所得的高度为 68.65mm。实物面具猴的鼻尖高度为 26mm，测量所得高度为 26.33mm。因而采用本文方法的测量相对误差范围约在百分之一左右。测量相对误差的存在可能由以下几个方面的因素导致：投射的正弦光栅和相移量不够准确；在测量相机到投影仪之间的距离以及二者到参考平面之间的距离时，测量存在误差；解包裹方法得到的相位值不够精确等。但从实验结果来看，本文的三维测量方法和三维测量系统是具有一定可行性的，且具有一定的实际应用的意义。图 5.4 为人脸面具的高度的等高图。

## 5.2 结果分析

在本章中，面具猴和人脸面具的三维测量都是采用测量系统中的左相机来采集图片的。由于面具猴的整个面部高度变化较为平缓，且整个面部没有高度突变，因而通过左相机采集的图片不存在阴影区域，测量得到的三维数据也比较完整，如图 5.1 和 5.2 所示。又如图 5.3 所示，由于人脸面具头部的高度变化过快，且在测量过程中人脸面具放置的位置为：下颌部分朝向相机，头顶部分远离相机。从而导致了左相机采集的图片在头部部分（特别是头顶偏右侧部分）存在阴影区域，最终导致了测量的三维数据在头顶部分特别是头顶偏右侧部分有所缺失，在图 5.3

中画圈的区域（及周围区域）是三维测量的误差部分。要解决测量误差这个问题，需要多个相机从不同的角度对被测物体进行图像采集，或者改变物体和测量相机的相对位置，最后将不同视角得到的数据进行三维拼接。具体的方法将在第六章做详细介绍。

## 6 三维面形的拼接

### 6.1 三维面形常用拼接方法简介

在条纹投射三维测量方法中,由于三角测量方法本身的特性,在某些情况下并不能从单一视角直接获取所测物体全部的三维信息。如:被测物体本身尺寸较大,从单一视角不能采集到完整的信息;所测物体本身面形较为复杂,面形的某部分坡度过大、倾斜角过大或者局部存在镜面反射等情况,都会导致所采集到的条纹数据图存在局部阴影。从而导致测量得到的三维数据不完整。要解决这些问题可以选取多个视角对物体进行测量(具体视角的个数由被测物体的具体情况而定),也可以利用被测物体与测量系统之间的相对运动来得到不同角度的三维数据,并最终通过坐标系的变换和数据融合得到所测物体的完整的三维数据。但由于靠相对运动进行拼接的方法需要分别完成多次测量,因而多个视角的拼接方法更有利于完成实时测量。

多视角测量数据由于采用的视角不同,因而测量得到的世界坐标系也是不同的,因而会涉及到一个从局部坐标系到全局坐标系的转换问题,然后通过数据处理,最终获得完整的三维测量结果。这个过程就称之为面形的拼接,也可以称之为拼合或者是多次测量数据的配准<sup>[30,31]</sup>。测控各个局部空间方位的方法有很多,可以通过硬件设备进行测控,如:可以通过定位系统实现或者是通过光学或电磁学跟踪系统实现。也可以不通过硬件设备来对局部坐标进行测控,可以采用计算机软件处理的方法。如:上海大学应用光学与检测实验室提出的多孔径扫描拼接技术<sup>[32-39]</sup>;通过标记点进行数据拼接;以及由郭红卫和陈明仪提出的圆柱坐标系下多孔径扫描拼接技术的迭代方法等。

三维面形的拼接一般主要包括两个部分:不同视角坐标系的变换和数据的融合。

#### 6.1.1 数据的坐标变换

由于从不同视角和改变测量系统和所测物体的位置关系以后测得的三维数据,坐标系是不同的,因而三维面形拼接关键的第一步就是要将不同坐标系下的三维测量数据统一到同一个坐标系中。而且不同角度的测量需要有重叠的部分,最终才能完成拼接。三维面形测量的位置变换包括两个方面,即平移和旋转变换。因而在计算时只需要考虑:平移向量和旋转向量<sup>[40]</sup>。

若设物体上的某点  $M(X,Y,Z)$ ,经过位置变化后坐标变为  $M'(X',Y',Z')$ ,若位置变化中平移量为  $x,y,h$ ,绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的旋转角度分别为  $\alpha,\beta,\gamma$ ,则有,平移矩阵为:

$$T_m = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

绕 x 轴、y 轴、z 轴的旋转矩阵分别为：

$$T_{cx} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

$$T_{cy} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

$$T_{cz} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

经过平移旋转后得到的第二次测量的坐标，若要将第二次测量的坐标系统一到第一次的坐标系中，则有：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = T_m T_{cx} T_{cy} T_{cz} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

因而，数据的坐标变换的过程，主要是求解  $\alpha, \beta, \gamma$  和  $x, y, h$  的过程。通过提取不同视角测量数据的特征点可以将这些未知量求解。

### 6.1.2 数据的融合

当坐标变换的关系确定以后，需要对两次测量数据的公共部分进行数据融合才能完成拼接，所谓数据融合就是对共同区域部分的数据做平滑过渡处理。如图 6.1<sup>[41]</sup>所示。若左边的区域表示第一次测量所得的数据区域，右边的区域表示从不同视角测量所得的数据区域，中间的部分表示两次测量的重叠区域。

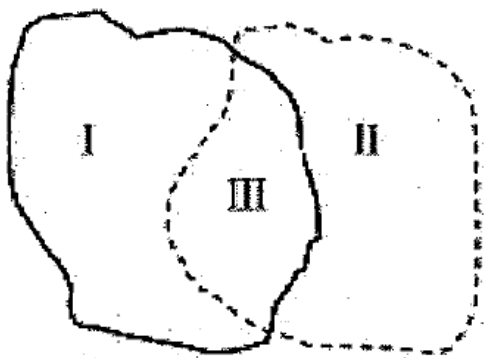


图 6.1 数据融合示意图

Fig6.1 Schematic diagram of mosaic

要得到整个物体的完整的三维数据，就需要把不同视角测量的数据拼合起来，由于测量的数据会存在测量误差，若简单的把两次测量的数据直接放在一起效果并不好。因而需要对重叠的区域做数据融合处理。通常采用的数据融合处理的方法有数据插值或者是曲面拟合的方法。虽然采用迭代运算也可以做处理，但是计算量较大。

## 6.2 基于人脸特征的拼接方法

由于人的脸部有着比较突出的特有特征，就是鼻尖的位置是脸部高度最高的位置，因而可以根据这个特点设计出在 $180^\circ$ 范围内基于人脸特征的快速拼接方法<sup>[43]</sup>。这种方法的运算速度较快，拼接也较为准确，可用于人脸的快速拼接。该方法主要包含两个部分：拼接区域的选择和拼接区域的数据处理。具体方法如下：

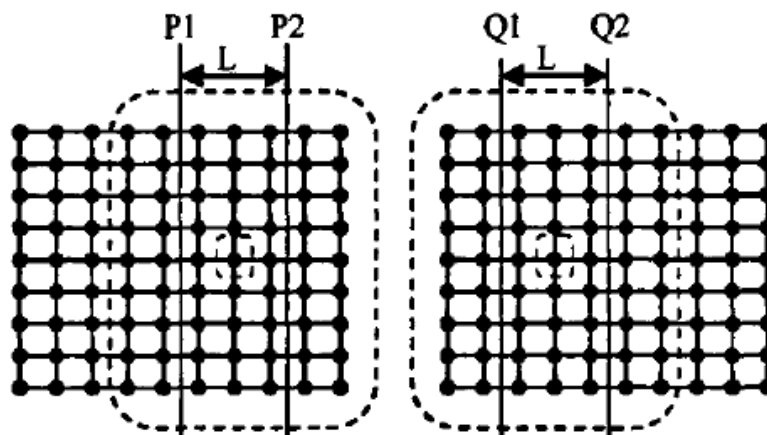


图 6.2 拼接区域示意图

Fig6.2 Schematic diagram of mosaic area

### 6.2.1 拼接区域的选择

如图 6.2 所示，若用图片中的每个点表示三维测量数据中每个点对应的平面坐

标的位置。左边的区域表示通过左相机采集图像，计算得到的三维数据中对应点的平面图；右边的区域表示由右相机采集图像后，通过计算得到的每个点的平面图。由于鼻尖位置最高，因而在  $Z$  方向应该具有最大值，因而可以把鼻尖位置作为特征点。大的虚线框表示分别由左相机和右相机进行测量的重叠区域；左右测量数据中的  $Z$  值最大的点，在左右平面图中的位置如小虚线框中的点所示。理论上这两个点对应的是实物上的同一个点，高度值应该相等。但由于测量误差的存在，测得的高度值可能并不相等。以鼻尖为中心选择宽为  $L$  的区域为拼接区域，且  $L$  的宽度是关于最高点位置呈左右对称的， $L$  的宽度必须小于重叠区域的宽度。由于通过左相机测得的靠右侧的数据并不十分准确和完整，因而可以把拼接区域以外右侧的数据直接去掉。相应的可以把通过右相机图片采集后计算的到的三维数据拼接区域以外左侧的数据删除。以鼻尖为中心，宽为  $L$  的区域就是拼接区域， $L$  的具体宽度是根据实际测量的数据情况和重叠区域的情况而定的。

### 6.2.2 拼接区域的数据处理

由于三维测量存在误差，因而左右相机测量同一点的高度也不可能完全相同。因而要对左右相机测量得到的拼接区域内的数据做处理。处理的方法一般有插值法和曲面拟合的方法。本文采用的是加权平均的方法对拼接区域内的数据进行融合。由于相对于左相机测量的数据来说，拼接区域靠右侧的部分测量精度较低，而且可能存在测量误差区域，因而应该获得较低的权值，而拼接区域靠左侧的部分应获得较高的权值。同理，对通过右相机获得的数据来说，拼接区域右侧的部分应该获得较高的权值，左侧部分应获得较低的权值。因而拼接后，某点的高度值可以表示为：

$$Z_w = \left( \frac{X_{wc} - X_w}{W} + \frac{1}{2} \right) Z_{w1} + \left( \frac{X_w - X_{wc}}{W} + \frac{1}{2} \right) Z_{w2} \quad (6.6)$$

采用 (6.6) 式对左右拼接区域内的高度数据进行加权平均。在 (6.6) 式中， $W$  表示拼接区域的宽度， $X_{wc}$  表示的是拼接区域中点在宽度方向上的坐标，也就是鼻尖位置的宽度坐标。 $X_w$  表示拼接区域中某点  $w$  在拼接宽度方向上的位置坐标。 $Z_{w1}$  是通过左相机图像采集计算后得到的  $w$  点的高度值， $Z_{w2}$  是右相机采集后计算得到的高度值。 $Z_w$  是数据处理后  $w$  点的新高度值。由上式可知，当  $w$  点越靠近拼接区域的左侧时，通过左相机获得的高度值  $Z_{w1}$  获得的权值越高， $Z_{w2}$  获得的权值越低；若  $w$  点越靠近拼接区域的右侧， $Z_{w1}$  获得的权值越低， $Z_{w2}$  获得的权值越高。因而通过 (6.6) 式对拼接区域的数据进行处理，可以达到加权平均的目的，使准确度越高的数值获得较高的权值，使靠近相机采集图像边缘的点获得的权值较低。通过加权平均的方法可以使处理后的拼接区域的高度数据更可靠。



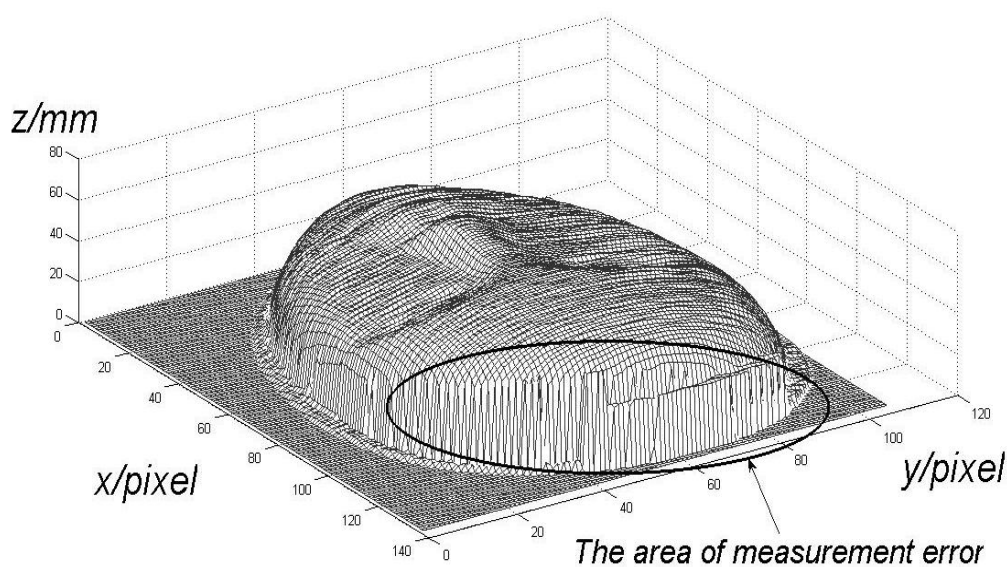
## 6.3 基于人脸特征的拼接方法的数据处理结果及分析讨论

### 6.3.1 基于人脸特征的拼接方法的数据处理结果

如本文第五章中所介绍，由于人脸面具边沿的高度变化较快，因而从单一视角测量得到的三维数据存在较大的误差区域。采用本章中 6.2 的基于人脸特征的拼接方法的基本原理，使用 MTLAB 编程实现该方法。对人脸面具通过左右相机测量得到的三维数据进行拼接。

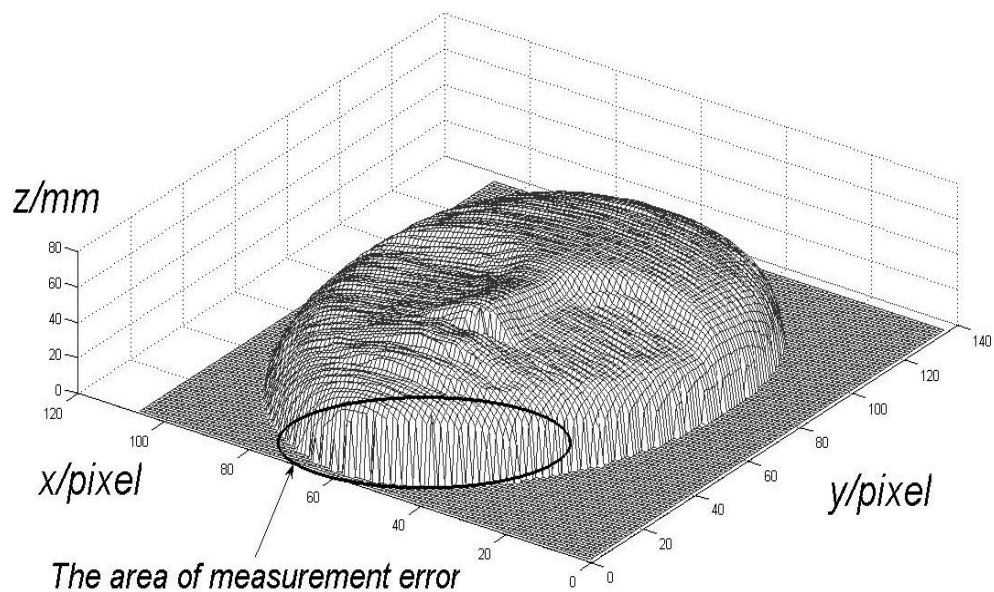
在通过测量系统对图像进行采集时，人脸面具的位置摆放为：头顶部分朝向右相机，下颌部分朝向左相机。且投影和采集系统位于人脸面具的偏右侧方向。由于人脸面具边沿的高度变化比较快，因而从单一视角采集到的正弦光栅投影图像会存在阴影区域，导致了测得的三维数据在局部区域存在缺失，从而导致了三维测量的不完整和不准确。

如图 6.3 (a) 所示，由于人脸面具的头部朝向右相机，且投影和图像采集系统位于人脸面具的偏右侧，因而导致了通过左相机采集到的正弦光栅投影图片，在人脸面具的头顶部分特别是头顶偏左侧的部分存在阴影区域，因而得到的三维数据在这部分存在较大的误差。同理，通过右相机图像采集得到的三维数据会在下颌部分，特别是下颌的左侧部分存在较大的误差，如图 6.3 (b) 所示（测得三维数据的具体计算方法在本文的第三章和第四章中已详细介绍）。要得到完整的三维测量数据，可以对左右不同视角测量得到的三维数据进行拼接，从而可以避免测量误差较大的区域，得到完整的三维测量数据。



(a) 左

(a)From the left camera



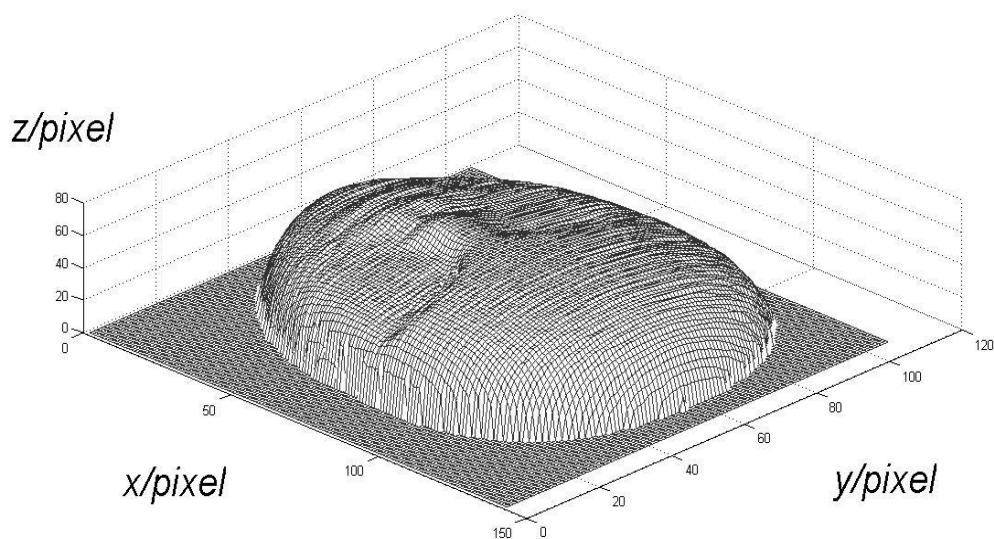
(b) 右

(b) From the right camera

图 6.3 分别通过左右相机图像采集后计算得到三维数据

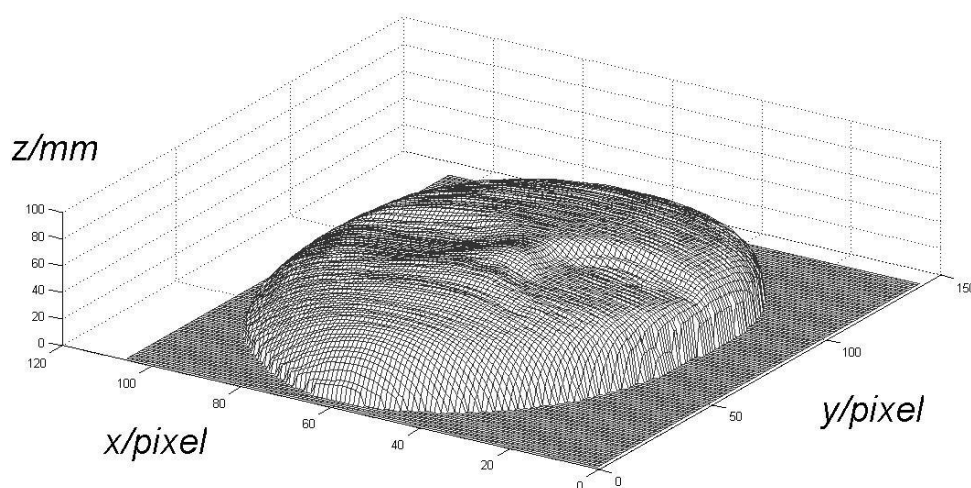
Fig6.3 Three-dimensional data obtained by calculation after collecting respectively by left and right camera

采用基于人脸特征的快速拼接方法，对图 6.3 中的三维测量数据进行处理。拼接结果三维显示如图 6.4 所示。



(a) 视角 1

(a) One angle of view



(b) 视角 2

(b)Another angle of view

图 6.4 拼接后从不同视角的效果图

Fig6.4 Effect picture from different visual angles after mosaic

6.4 中的 (a)、(b) 二图是从不同视角看到的拼接后的三维数据的三维效果图。从图中可以看到拼接后得到的三维数据是比较完整的，避开了误差区域。而且以鼻尖为中心的周围的拼接区域在拼接后过渡光滑自然。

### 6.3.2 讨论

- ①基于人脸特征的三维拼接方法运算速度快，拼合效果好，可以用于对人脸识别的快速拼接。此方法不仅可以用于对人脸的拼接，也可以对表面某点高度特别突出(高度值特别高或者是特别低)的其他物体进行拼接。
- ②基于人脸特征的三维拼接方法的拼接范围的选择不一定要以特征点为中心，可以根据需要选择与特征点有一定距离的其它区域为拼接区域。
- ③如果测量的物体表面过大或者是面形更加复杂，可以采用更多的视角进行三维测量或者是采用将所测物体旋转等方法获得不同视角的三维数据，然后再进行三维拼接，从而得到更完整更准确的三维数据；
- ④在数据融合的方法中，可以根据需要选择其它的插值法或者是曲面拟合的方法来完成拼接。

## 6.4 本章总结

在本章中，首先对拼接的目的和意义及常用的拼接方法做了介绍。要接着对拼接的常用步骤做了总结，拼接方法中的主要步骤一般包括两步，即：数据坐标

系的变换和数据的融合；并根据人脸面具的特征采用了基于人脸特征的  $180^\circ$  三维曲面拼接方法，且具体介绍了该方法的具体计算过程并用 MATLAB 进行编程；以人脸面具为模型，分别用左右相机进行图像采集完成三维测量，对单视角三维测量误差区域产生的原因做出了分析，并采用基于人脸面具特征的拼接方法完成了拼接。

结果表明，这种拼接方法的拼合效果是较好的。拼接过后的数据不仅有效的消除了误差区域，而且拼接区域的过渡光滑、自然。

## 7 总结与展望

### 7.1 总结

在分析、比较目前常用的光学测量方法的基础之上，综合考虑测量精度和实验条件两方面的因素，设计了基于四步相移法的三维测量系统，并通过编程和硬件设备，使系统得以实现。本文所做的主要的研究工作有：

（1）在理论方面：阐述了光学三维测量方法的实际应用意义，对常用的光学三维测量方法的基本原理及优势和缺点进行了深入的了解和研究，且简要介绍了三维测量方法的研究现状和发展趋势；对相机标定、解包裹和三维曲面拼接的原理、常用方法以及意义也进行了研究。

（2）在实际操作和实验方面：对测量系统进行了标定；采用 MATLAB 对三维测量和拼接所需的软件系统进行编程，对程序进行优化以后，程序运行速度较快；采用图 2.1 中的投影和采集系统进行光栅投射和图像采集，并对图像进行处理。

（3）在创新方面：设计了基于相移法的三维测量系统；对质量引导不连续路径解包裹方法做了一定的改进；提出了基于人脸特征的拼接方法不仅可以用于人脸的拼接，而且可以对表面有某点具有突出高度的物体进行拼接，且拼接区域不一定要以鼻尖（或者具有突出高度的某点）为中心。

如果要获得更好的测量效果和更高的测量精度，在本文所做工作的基础之上，可以在以下方面加以改进：

（1）对投射的正弦光栅进行校正，并对相移量的精度做更高的要求；

（2）本文采用的是质量引导不连续路径的解包裹方法，此方法是属于空域相位展开技术的一种。虽然此方法在空域相位展开算法中有着算法较简单、解包裹效果较为理想的优势，但时间相位展开更具有优越性。若采用时间相位展开算法，不仅被测物体的范围将被拓宽（时间相位展开算法能够较准确测量表面断裂和带孔洞及具有高度突变的物体的三维形貌），而且时间相位展开算法更易于实现实时测量。

（3）在拼接方法中本文采用的是  $180^\circ$  的基于人脸特征的拼接方法，对表面某点具有突出高度的物体才能进行拼接。可以根据实际需要选择更多视角，更精确、适用范围更广的拼接方法。

（4）可以在本文系统的基础之上连接三维打印机，对测得的数据进行三维打印，就可以实现人脸三维照相。

但总的来说，本文设计的相移法三维测量系统还是具有一定的实用意义的。

## 7.2 展望

随着三维测量技术理论和实验仪器及技术的不断发展和提高，在不久的将来三维测量技术将能完成以下测量：

(1) 能够准确测量表面有断裂、突变和带孔径的物体，能够对大面型和表面变化较复杂的物体进行高精度的测量。

对大面型物体的三维测量，如对房、车等物体的测量。对这类物体进行三维测量首先测量方法的选择就是一个难点，其次如何保证测量的精度又是另一难点；有的物体表面形状变化较为复杂，如：物体具有较深的孔径、物体表面高度变化过快、过复杂，物体表面过于光滑存在反光等。对这些物体进行准确的三维测量，也是三维测量中急需解决的问题。

(2) 能够完成实时测量，实时三维测量对三维测量有着比较重要的意义，是关系到测量效率的问题。

如果能完成实时的三维测量，在工业生产中，可以提高生产效率；在生物医学诊断中，能帮助医生更快速的对病人的病情做出准确的判断；在实际生活中，可以实现三维快速拍照、物体快速复制等。将会给人们的生活带来一定的改变。

(3) 能够对运动中的物体进行准确的三维测量。如：对飞行中的鸟、运动中的人等进行三维测量。在实际生活中，绝大部分的物体是处于运动状态的。因而，真正意义上的三维测量绝不仅仅指对静止物体的测量。

然而要完成对运动物体的测量并不是一件容易的事，特别是处于高速运动状态的物体。若能完成此项技术，将在军事领域和不明飞行物体等未知领域及其它领域的研究上会有极大的帮助。

(4) 对微观或者是较小物体的三维测量。

不仅宏观物体具有三维轮廓特征，微观物体和较小物体（肉眼不能直接分辨）也具有。微观物质一般是处于运动状态的，如：细胞、分子等。完成微观和较小物体的精确三维测量具有较大的难度。但微观物体的三维测量将对新材料的发现和生物医学的新突破等领域上有所帮助。

## 致 谢

在重庆大学物理学院三年的研究生生活，过得充实而快乐，且受益颇多。在研究生学习生活的三年中，不仅学到了丰富的知识，而且对物体三维测量进行了研究并取得了一定的研究成果，学校各类丰富的学术报告也使我见识大增。

在此论文完成之际，首先要感谢我的导师王银峰副教授。论文从最初的选题到后来的进展和改进凝结了他的心血，同时也感谢他在生活上给予我的关心。同时，要特别感谢物理学院的何光宏副教授在论文实验过程中，在实验器材和在实验指导上对我的帮助。还要感谢理论物理研究所的老师，理论物理研究所的张忠灿、吴兴刚等老师也以他们严谨的学术作风和敬业的工作态度对我也造成了较大的影响。

感谢我的母校重庆大学提供给了我一个优良的学习和生活环境。感谢和我一起实验的学弟：马英群、冯帅、礼四同等，以及我可爱的 2010 级同学们在生活中给我的关照和快乐。

感谢我的家人，是他们一直支持我完成学业，提供给了我一个无忧的学习环境。

最后，感谢评阅我论文和前来参加答辩的各位专家和教授！

**潘玉玲**

二〇一三年四月 于重庆

## 参考文献

- [1] Haihua Cui,Wenhe Liao,Xiaosheng Cheng,et al.A three-step system calibration procedure with error compensation for 3D shape measurement [J].Chinese Optics Letters,2010,8(1):33-37.
- [2] Xi Juntong,Chen Xiaobo,iangtao,et al.Research and development of an accurate 3D shape measurement system based on fringe projection: Model analysis and performance evaluation[J]. Precision Engineering, 2008, 32: 215-221.
- [3] Feng Chen,Xianyu Su.Phase-unwrapping algorithm for the measurement of 3D object [J]. Optik,2012,(123):2272—2275.
- [4] YuhangHe,YipingCao. A composite-structured-light 3D measurement method based on fringe parameter calibration[J].Optics and Lasers in Engineering, 2011,49:773-779.
- [5] M.Thakur,C.Quan,CJ.Tay.Surface profiling using fringe projection technique based on Lau effect[J].Optics &Laser Technology,2007,39:453-459 .
- [6] 孙长库、叶声华.《激光测量技术》[M].天津大学出版社, 2001.
- [7] M. K. Kalms, W Osten, M Juptnen.Active industrial surface inspection with the inverse projected—hinge technique[J].Proc. SPIE, 2001, 4596: 37-47.
- [8] A. Pentland. A new sense for depth offield IEEE Tram[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(4): 523-531.
- [9] 苏显渝.基于时间相位展开的三维轮廓测量研究[D].四川大学博士学位论文, 2005.
- [10] 阳道善, 陈吉红, 周会成.线结构激光机器视觉三角测量光路设计[J].光学技术, 2001,27 (2): 120-122.
- [11] 李晶, 吴章江.基于图像处理的激光双三角法测量三维曲面[J].激光与红外, 2001,31 (2): 87-89.
- [12] H. Takasaki. Moire topography,[J].Appl. Opt.,1970, 9: 1467—1472.
- [13] M Takeda.K Mutoh . Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J].Appl. Opt.1983,24.
- [14] Xianyu Su.Wenjing Chen .Fourier transform profilometry[J]:a review 2001.
- [15] 李江雄, 吴恩启, 何映林.一种新型的微细管道内表面形貌检测器[J].浙江大学学报(工学版) 2006,40 (9): 1619-1623.
- [16] 邱茂林, 马颂德, 李毅.计算机视觉中摄像机标定综述[J].自动化学报, 2000,26 (11): 43-55.
- [17] Abdel,Karara.Direct linear transformation into object space coordinates in close range photogrammetry[C].Urbana: Proceedings of symp close range photogrammetry,1971:1-18.
- [18] Tsai R Y. A Versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision



- metrology using off the shelf TV cameras and lenses[J].IEEE Journal of robotics and automation 1987,3(4):323-344.
- [19] Hartley R I. Estimation of relative camera position for uncalibrated[C]. Proceedings of the ECCV92,1992:379-387.
- [20] Hartley R I.In defence of the 8-point algorithm[C].Cambridge:Proceeding of 5th International conference on computer vision,1995:1064-1070.
- [21] Maybank S,Faugeras O.A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision,1992,8(2):123-151.
- [22] Hartly R I.Self calibration of stationary cameras[J].International Journal of computer Vision,1997,22(1):5-23.
- [23] 胡占义, 吴福朝.基于主动视觉摄像机标定方法[J].计算机学报, 2002,25 (11): 1149-1156.
- [24] Ma S D.A self calibration technique for active vision system[J]. IEEE Transactions on Robot Automation,1996,12(1):114-120.
- [25] 钱晓凡,饶凡,李兴华等.精确最小二乘相位解包裹算法[J].中国激光,2012,39(2):1—5.
- [26] Huntley J M,Saldner H O.Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J].Applied Optics,1993,32(17):30-47.
- [27] 徐珍华, 苏显渝.一种时间相位展开算法[J].四川大学学报 (自然科学版), 2008,45 (3): 537-540.
- [28] A.Baldi.Two-dimensional phase unwrapping by quad-tree decomposition[J]. App.Opt, 2001,40:1187-1194.
- [29] Miguel Arevallilo Herraiez ,David R.Burton,Michael J.Lalor.Fast two dimensional phase unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. Applied Optics,2002,41(35):7437-7444.
- [30] Masashi Otsubo,Katsuyuki Okada,Jumpei Tsujiuchi.Measurement of large plane surface shape by connecting small-aperture interferograms[J]. Opt.Eng, 1994,33(2): 608-612.
- [31] Bergevin R,Lanrendeau D,Poussart D.Registering range views of multipart objects[J]. Computer vision image understanding,,1995,6 (1): 1-16.
- [32] 冯雷, 陈康宁.多视角数据的配准[J].西安交通大学学报, 2002, 36(3):270-273.
- [33] 程维明, 陈明仪.用齐次坐标实现子孔径变换与拼接[J].上海科技大学学报, 1993,16 (4): 363-369.
- [34] Chen Weiming ,Chen Mingyi.Transformation and connection of subapertures in the multiaperture over-scanning technique for large optics tests[J].Opt.Eng,1993, 32 (8): 1947-1950.
- [35] 陈明仪, 吴德柱, 陈维明等.用条纹图像拼接方法测量三维大物体面形[J].光学学报, 1998,18

- (1): 74-79.
- [36] 吴德柱, 陈明仪. 影响条纹图像拼接法测量精度的主要误差因素[J]. 光学学报, 1998, 18(11): 1576-1581.
- [37] 程维明, 陈明仪, 丁峥等. 圆柱坐标下的多孔径拼接测量三维面形[J]. 光学学报, 1999, 19(6): 811-815.
- [38] 郭红卫, 陈明仪. 圆柱坐标下多孔径扫描拼接技术的迭代方法[J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1047-1052.
- [39] Hongwei Guo, Mingyi Chen. Multi-view connection technique for 360-deg three-dimensional measurement[J]. Opt. Eng. 2003, 42(4): 900-905.
- [40] 何海涛, 郭红卫, 于赢洁等. 基于虚拟圆柱的曲面拼接方法[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 978-982.
- [41] 李勇, 苏显渝, 吴庆阳. 双摄像机相位测量轮廓术系统标定与数据融合[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 551-556.
- [42] 边心田. 基于FTP的物体三维面形拼接技术研究[D]. 四川大学硕士论文, 2007.
- [43] 程潇, 童卫青. 一种三维人脸图像的快速拼接方法[J]. 图形图像, 2008, 297: 100-102.

## 附 录

### 在攻读学位期间发表的论文:

[1] 潘玉玲, 何光宏.一种基于相移法的三维形貌测量方法[J].重庆理工大学学报 (已录用)。

## 学位论文独创性声明

本人声明所呈交的硕士学位论文《相移法三维测量系统》是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，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。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了谢意。

学位论文作者签名：潘玉玲

签字日期：2013.6.24

导师签名：王银峰

签字日期：2013.6.24

## 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆大学有关保留、使用学位论文的规定。学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编学位论文，可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版。

非军工项目保密的学位论文在解密后也遵守此规定。（涉密期限至\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日。）

作者签名：潘玉玲

导师签名：王银峰  
2013年6月24日

备注：审核通过的军工涉密论文不得签署“授权书”，须填写以下内容：

该论文属于军工涉密论文，其密级是\_\_\_\_，涉密期限至\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日。

说明：本声明及授权书必须装订在提交的学位论文最后一页。