

学 号： 2014213282

密 级： \_\_\_\_\_

合肥工业大学

Hefei University of Technology

# 本科毕业设计（论文）

UNDERGRADUATE THESIS



类 型：	论文
题 目：	数字 Morie3D 测量方法及精度分析
专业名称：	应用物理学
入校年份：	2014 级
学生姓名：	张凡
指导教师：	袁自均 副教授
学院名称：	电子科学与应用物理学院
完成时间：	2019 年 6 月

合 肥 工 业 大 学

本科毕业设计（论文）

数字 Morie3D 测量方法及精度分析

学生姓名：张凡

学生学号：2014213282

指导教师：袁自均 副教授

专业名称：应用物理学

学院名称：电子科学与应用物理学院

2019 年 06 月

**A Dissertation Submitted for the Degree of Bachelor**

**Digital Morie 3D Profilemetry and Its Error Analysis**

By

Zhang Fan

Hefei University of Technology

Hefei, Anhui, P.R.China

June, 2019

## 毕业设计（论文）独创性声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）是本人在指导教师指导下进行独立研究工作所取得的成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，设计（论文）中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文成果做出贡献的个人和集体，本人已在设计（论文）中作了明确的说明，并表示谢意。

毕业设计（论文）中表达的观点纯属作者本人观点，与合肥工业大学无关。

毕业设计（论文）作者签名：                    签名日期：        年    月    日

## 毕业设计（论文）版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用毕业设计（论文）的规定，即：除保密期内的涉密设计（论文）外，学校有权保存并向国家有关部门或机构送交设计（论文）的复印件和电子光盘，允许设计（论文）被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库，允许采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编毕业设计（论文）。

（保密的毕业设计（论文）在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：                                    指导教师签名：

签名日期：        年    月    日        签名日期：        年    月    日

# 摘要

三维测量技术是通过 CCD 图像，距离磁感应等传感器等采集到的数据，通过后端算法处理，还原出物体表面高度信息的测量方法，根据具体选取得测量设备，处理算法不同，广泛应用于文物 3D 扫描，逆向工程，工业测量等，生物医疗成像领域。

本文的研究内容重点是数字莫尔三维测量方法的图像处理算法。本文的工作首先是为合肥工业大学 3D 打印实验室在搭建数字莫尔三维测量实验平台之前，提供验证和仿真，支撑实物平台的设计方案。其次，根据仿真环境下，摄像头，投影仪，和被测物体的集合参数，参考文献，推导莫尔条纹和物体高度信息的对应关系，并验证该关系在使用数字相移方法时具有不变性。再者，在仿真环境下，分析和优化数字莫尔三维测量处理算法，并实现一定成果。最后，对比不同处理算法的时间，空间成本，选择适合三维测量人物的方案，并分析误差来源。

**关键词：**三维测量法；莫尔条纹；数字相移；图像处理；误差分析

# ABSTRACT

Profilemetry technology restores the digital recordings of the object height information by processing the data collected from various sensors, such as CCDs and magnetic proximity switches, which are selected according to different tasks and processing algorithms. Recently, it has seen tremendous efforts on commercializing the technology for purposes covering archeological 3D Scan, Reverse Engineering, Industrial Inspection and Medical Imaging.

This thesis focuses on one of the most promising solutions for Profilemetry, the Digital Morie 3D method. First, before the 3D Printing Center of HFUT invests resources on developing Morie 3D device, this research verifies and simulates the proposed designs. Second, the mathematical relation between the Morie Pattern and the height information of the object can be affirmed since the geometrical parameters from the camera, the projector and the object can easily be attained in simulation. Third, by the convenience for simulation, the algorithms for processing images captured in the Digital Morie 3D method, is analyzed and optimized for the end. Finally, the appropriate algorithms will be recommended by comparing its algorithmic complexity and errors.

**KEYWORDS:** Profilemetry; Morie Pattern; Digital Phase-shift; Image Processing; Error Analysis

# 目 录

1	绪论 .....	1
1.1	三维测量方法对比 .....	1
1.1.1	三坐标测量机 .....	2
1.1.2	光学三维测量 .....	错误!未定义书签。
1.2	数字莫尔三维测量方法过程 .....	3
1.3	数字莫尔三维测量方法的应用 .....	4
2	相位-高度对应关系 .....	6
2.1	传统莫尔三维测量的相位-高度对应关系 .....	错误!未定义书签。
2.2	数字莫尔三维测量的相位-高度对应关系 .....	8
2.2.1	模拟环境下的相位-高度对应关系 .....	错误!未定义书签。
2.2.2	真实环境下的相位-高度对应关系 .....	错误!未定义书签。
3	实物系统校准 .....	11
4	数字相移 .....	16
5	高频载波滤波 .....	17
6	相位提取展开 .....	18
7	实验过程和结果 .....	19
8	结论 .....	20
	参考文献 .....	21
	致谢 .....	22
	附录 .....	23

# 插图清单

(宋体，小二，加粗；居中，单倍行距，段前 0.5 倍、段后 1.5 倍行距，如论文无图此页可删除)

未找到图形项目表。||

未找到图形项目表。||

||

(宋体，小四号；左对齐，固定行距 22 磅，段前、段后均为 0 行)



## 表格清单

(宋体，小二，加粗；居中，单倍行距，段前 0.5 倍、段后 1.5 倍行距，如论文无表格此页可删除)

未找到图形项目表。

未找到图形项目表。！

！

(宋体，小四号；左对齐，固定行距 22 磅，段前、段后均为 0 行)

T0-D0：增加公式编号，检查图片和表格编号

# 1 绪论

为了把握数字莫尔三维测量技术的研究背景和任务，本节对比了常用的机械三维测量方法和光学三维测量方法，并简要介绍了两种方法的实现原理和适用场景。在阐述了数字莫尔三维测量所具有的优势后，本节第二部分介绍了数字莫尔三维测量每个步骤的目的和专业术语，为后文详细讨论各项技术做铺垫。最后，本节在数字莫尔三维测量方法的应用上做了一定的调研。

## 1.1 三维测量方法对比

三维测量，又称三维面形测量根据其采用物理性质，实现方式不同，分别在不同在各领域多样的测量要求下，发挥着重要作用。首先，从物理机制上，可分为光学三维面形测量，电磁学三维面形测量, 超声波三维面形测量，和机械三维测量。借助光学，电磁和超声波等物理特性的测量方法，不需要接触被测物体，因此对被测物理损伤较少。这三者中，光学三维测量对被测物体的作用更是微小。但机械三维测量采用的一般时接触测量方法，适合测量不易变形的机加工件，在工业生产上也得到广泛应用。

表 1 三坐标测量机和光学三维测量对比

	三坐标测量机	光学三维测量
安装校准	一次性安装校准，但费用贵	无需安装，移动设备需校准
适用表面	坚硬，粗糙细腻都可	坚硬柔软都可，不反光，突变不多
量程	固定，由设备尺寸决定	较大，有投影图样和设备分辨率决定
算法难度	前期路径规划，NP 问题	后期图像处理，可借助 GPU 并行处理
成本	非常昂贵，维护成本高	较昂贵，但设备普及
便携	由于测量精度要求，无法随意移动	部分方案，可随意移动
精度	非常高	还原三维模型，精度差
时间	前期路径规划时间长，测量时间长	测量时间短，处理时间较长

### 1.1.1 三坐标测量机

三坐标测量机原理是在测量平台上，建立相对坐标系后，由后端算法生成控制 CNC 系统移带动测量头移动的 G 代码，并对被测物体多点接触，提取大量接触点的空间坐标。因此三坐标测量机属于接触式测量。在实际应用中，三坐标测量机的效率，（即测量同一集合尺寸的物体所需时间），取决于后端控制软件生成的采样轨迹。为了在短时间内获得物体的三维信息，有学者基于样条函数等数学工具，提出改进方案，但仍需要一定的测量时间[1]。但由于该方法使用的接触传感器为压电陶瓷等灵敏度较高的材料，测量精度高，甚至在前沿研究上，在使用微动平台，在封闭试验箱环境下，可以到达纳米级别[2]。在工业生产上，三坐标测量机，采用高精度 CNC 系统和接触传感器，能胜任大多数机加工工件检测[3, 4]和逆向三维建模[4]。但是，该方案有以下局限性：受到测量平台和 CNC 系统运动范围的约束，量程相对有限；需要和物体接触，无法测量易变形，运动中物体；虽然由于机加工零件少有不规则曲面能胜任一般工业检测[1]，但不适用于复杂曲面的三维测量。

### 1.1.2 光学三维测量

与三坐标测量机方案所采取的接触式，机械式的测量方式不同，光学三维测量方案将作带有一定调制的图样投射到待测表面，采集图像后，利用电脑后端处理算

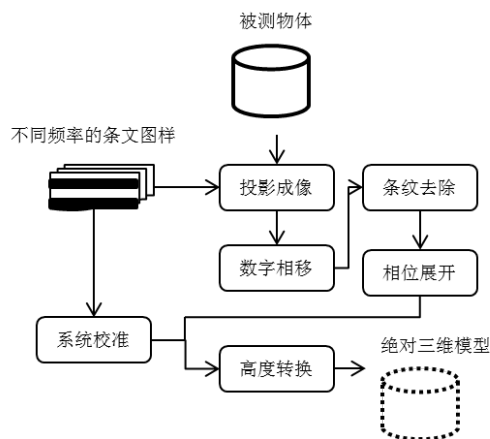


图 1 数字莫尔三维测量流程图

法，还原被测表面高度信息。目前光学三维测量的成像方法包括，条纹调制，格状调制，连续变化函数调制和多次投影法[5]。根据使用的成像方法，设计方案和测量目的不同，选择的设备和后端处理算法也不同。例如，属于多次投影调制的数字

莫尔三维测量方法在实物测量过程中，在测量普通待测物体时，仅仅需要普通相机和投影仪即可，但当待测物体在移动速度较快时，则需要使用高速相机和能较高刷新频率的投影仪[6]。但总体而言，光学三维量程相对较大，设备简单，成本低廉，可测量柔软和移动中物体。

## 1.2 数字莫尔三维测量方法过程

数字莫尔三维测量将传统莫尔测量的产生莫尔图样和由莫尔图样得出所测表面三维模型的过程转移到计算机处理。在传统莫尔测量方法中，需要投影光栅和参考光栅重合形成对应等高线的莫尔图样[7]。而在数字莫尔测量方法中，投影光栅被投影仪的数字光处理芯片代替，直接将莫尔图样投影到被测物体上，然后由数码相机的 CCD 传感器捕捉图片，最后在利用电脑程序，将和投影条纹同频率但是不同初始相位的条纹图样重合，形成莫尔条纹。使用后端处理算法叠加条纹和被物体高度信息扭曲的条纹图样，产生莫尔条纹的过程，称为数字相移。进过数字相移得到的莫尔图样，不仅包含有我们需要的等高线，还包括调制物体高度信息的高频条

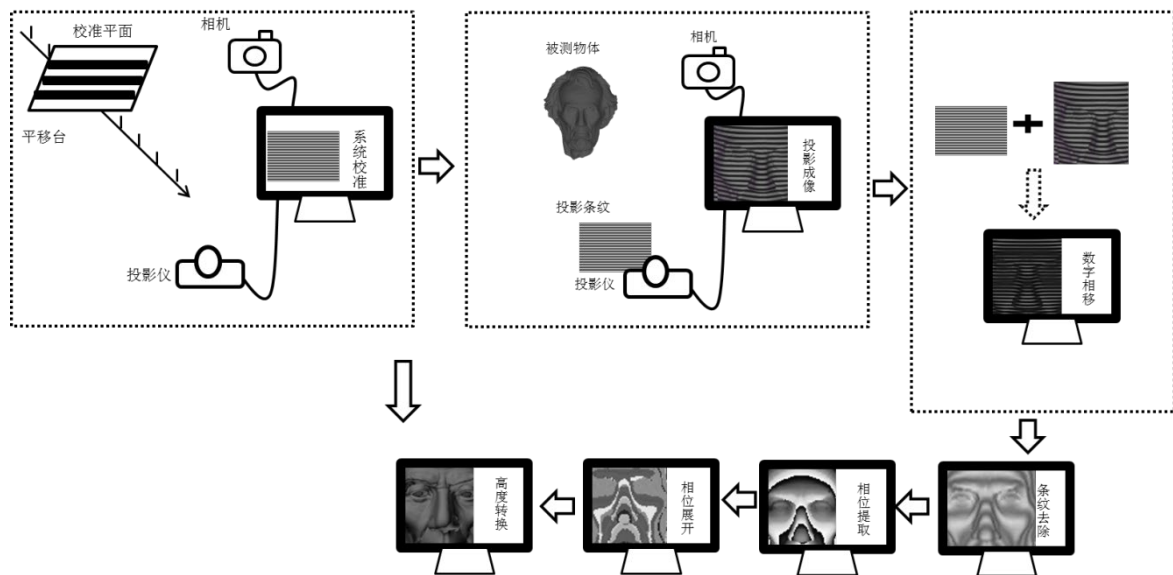


图 2 数字莫尔三维测量实验装置示意图：从左上角按箭头方向依次，系统校准，投影成像，数字相移，条纹消除，相位提取，相位展开，高度转换

纹。为了得到单一高线信息，为下一步处理做准备，数字相移的图像要经过进一步滤波。将数字相移得到的图像去除高频噪声的方法叫做条纹去除。经过这两步的单张莫尔图样，需要结合，其他莫尔图样，利用三角函数关系，得出和被测面高度对应的相位。这一过程成为相位提取。在相位提取过程中的多张莫尔图样，必须是由

不同初始相位但是统一条纹频率的条纹图样投影，数字相移得到。但经过相位提取的相位图像，并非和被测面高度直接对应，因此被称为折叠相位。由于使用的三角函数关系具有  $2\pi$  整数的不确定性，提取的相位需要使用不同条纹频率得到的折叠相位作为参考，最终得出连续变化的，对应物体高度的展开相位。使用不同调制频率的条纹得到的折叠相位作为参考，补充直接折叠相位和直接高度对应关系  $2\pi$  整数的差异的过程，成为相位展开。至此，一个符合物体相对几何特征的相位已经得到。之后，本文的研究成果——在仿真环境下，得到一个被测物体相对几何特征较为准确的三维模型——能结合实物测量系统的校准给出的莫尔波长，最终得出物体的绝对三维模型。使用平板，在不同高度位置，测量莫尔波长，最终得出莫尔波长和高度对应关系的过程称为为系统校准[8]。利用相高关系得出被测物体绝对三维模型的过程称为高度转换。

### 1.3 数字莫尔三维测量方法的应用



图 3 数字莫尔三维测量方法的应用：a)杭州先临三维科技有限公司的基于光栅光学的三维扫描仪；b)意大利学者利用莫尔三维测量技术部分数字化的古文物遗址蒙特祖玛城堡

数字莫尔三维测量因具有不需要直接接触被测物体，量程大等优点，易携带等优点，在实践生产生活中有诸多应用。首先在工业生产中，有学者提出使用数字莫尔技术检测汽车表面喷漆平整度的方案。这一方案充分利用了数字莫尔三维测量的非接触性，和量程大的特点，结合后期处理软件，自动识别产品瑕疵[9]。在逆向工程和快速原型搭建方面，位于浙江杭州的先临三维科技有限公司<sup>i</sup>开发的基于光栅光学的桌面 3D 扫描仪系列，将投影仪和照相设备封装在一起，结合底部的匀速选装平台，充分拓展了数字莫尔三维测量技术无法测量物体背面的局限性[10]。在文物保护方面，在 2005 年，意大利学者已使用莫尔三维测量技术，数字化意大利著名古建筑蒙特祖玛城堡<sup>ii</sup>的泥砖外墙[11]。除此以外，该三维测量方法医疗，辅助科学研究方面等其他方方面均有重要应用[12]。



## 2 相位-高度对应关系

传统莫尔三维测量和数字摩尔测量不同在于三点。首先是光栅的使用：传统莫尔三维测量无论是投影莫尔法，还是阴影莫尔法，都需要使用至少一个光栅，而数字莫尔三维测量则是不再使用光栅，直接使用投影仪对物体投影条纹图样；其次是莫尔条纹产生的原理：对于传统莫尔方法，必须通过光栅和光栅的投影或者光栅和另一个相同参数的光栅在测量过程中就产生莫尔条纹，而数字莫尔测量则是在电脑后端处理使用数字相移实现莫尔效应；最后是后期处理：早期的莫尔测量由于信息技术的发展有限，只能得出莫尔条纹，并以此作为等高线，人工定标，操作复杂，而随着电脑处理器速度的提高，数字莫尔三维测量能使用后端处理算法，不仅能得到数字三维模型，同时还可使用拟合等多种手段提高精度[13]。

### 2.1 莫尔条纹产生原理

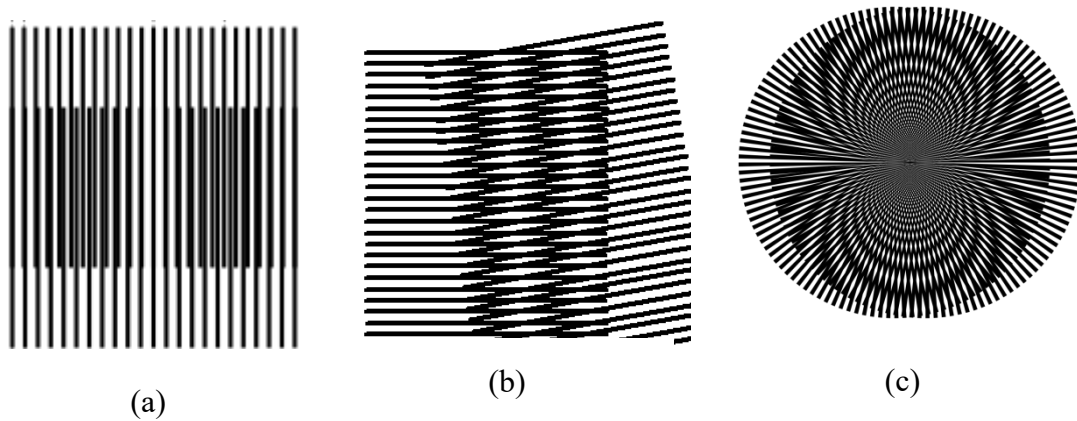


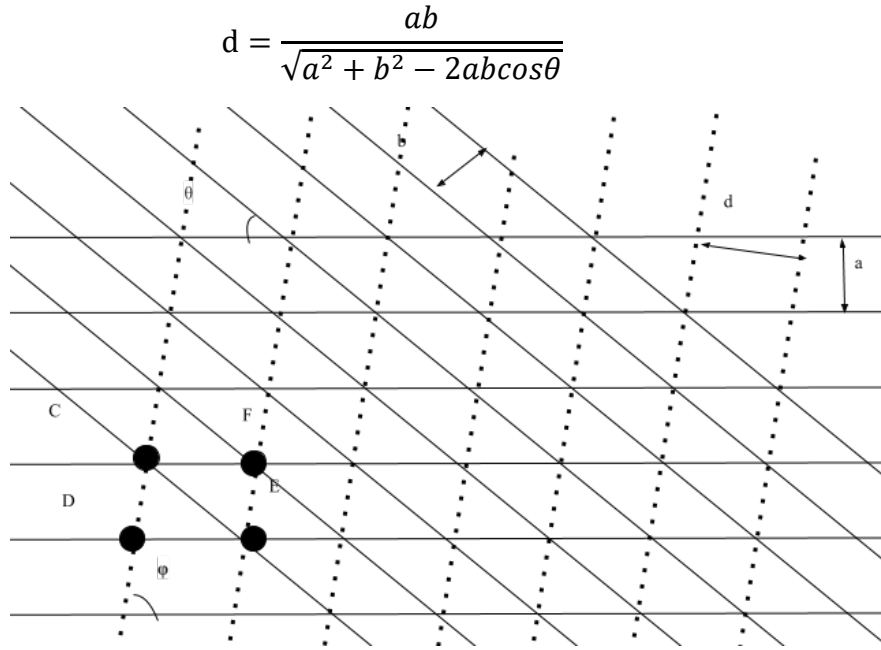
图 4 莫尔条纹产生方式：a)不同周期；b)成角度；c)不完全重合

莫尔条纹<sup>iii</sup>可由不同周期的，不同重复周期函数，不同光栅初始相位，光栅有夹角，不同光栅材料折射率等原因造成[14]。首先讨论等间隔不同周期光栅叠加。如图，等间隔光栅 A，间隔 $a$ 和等间隔光栅 B，间隔 $b$ 以 $\theta$ 角度重合。下图中，黑色虚线为莫尔条纹，水平直线组代表光栅 A，倾斜直线组代表光栅 B。观察几何关系，可得，

$$S_{CDEF} = DE \times a = CD \times d = CE \times b$$

$$CD^2 = CE^2 + DE^2 - 2CE \times DE \cos \theta$$

将  $DE$ ， $CD$ ， $CE$  均用  $S_{CDEF}$  和  $a$ ， $b$ ， $c$  等表示，约分化简可得，



又可由，

$$\sin\varphi = \frac{d}{DE}$$

$$DE = \frac{b}{\sin\varphi}$$

可得，

$$\sin\varphi = \frac{a\sin\theta}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta}}$$

则，可由重叠光栅的间隔和交角计算出莫尔条纹的周期间隔和相对于光栅的夹角。当 $a = b$ 时，即使用相同间隔光栅重叠时，可得，

图 5 光栅重叠产生莫尔条纹

$$d = \frac{a}{2\sin(\frac{\theta}{2})}$$

$$\sin\varphi = \cos\frac{\theta}{2}$$

此时，莫尔条纹和两光栅夹角的平分线垂直。由于数字莫尔三维测量使用的相同间隔周期的条纹重叠形成莫尔条纹，可以将物体扭曲的条纹处理为两光栅出现一定夹角，而该夹角根据被测物体各位置高度而变化。

使用简化几何关系分析莫尔条纹的产生和参数是解释莫尔现象的多种数学模型



之一[15]。除此之外，也有学者通过傅立叶变换和光栅透过率函数来研究不同频率条纹间隔，即不同周期光栅叠加产生的莫尔条纹[13, 16]。推导过程如下。

首先，是使用傅立叶级数 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 描述两不同频率的两不同光栅的透过率函数。描述一个非正选，且只在一定范围内周期重复的光栅，需要无穷多个不同系数的余弦函数分量求和。分量的系数决定了最后光栅的几何特征，而余弦函数的相位是关于位置坐标的函数，决定了具体以某一个光栅周期为中心展开。傅立叶级数表达光栅 1 和 2 的传递函数如下。

$$f_1(x, y) = a_1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)]$$

$$f_2(x, y) = a_2 + \sum_{m=1}^{\infty} b_{1m} \cos[m\phi_2(x, y)]$$

在上式中， $\phi(x, y)$ 对应表二中正弦函数中 $n\pi x/L$ ，即根据展开周期不同，展开周期具体个数不同，取不同的值。而系数 $b_{ij}$ 则对应着傅立叶系数，决定着最后求和所得到的光栅几何特征。上述二式可表述任何两不同光栅。

表 2 常见周期函数和其单周期傅立叶展开级数

函数名称	单个周期函数表达式	单周期傅立叶级数展开
方波	$2 \left[ H\left(\frac{x}{L}\right) - H\left(\frac{x}{L} - 1\right) \right] - 1$	$\frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
锯齿波	$\frac{x}{2L}$	$\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
三角波	$T(x)$	$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$

当这两个光栅重叠时，总体透过率函数为二者透过率函数之积，可表达如下。

$$f_1(x, y)f_2(x, y) = \left( a_1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)] \right) \left( a_2 + \sum_{m=1}^{\infty} b_{1m} \cos[m\phi_2(x, y)] \right)$$

$$\begin{aligned}
&= a_1 a_2 + a_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_{1m} \cos[m\phi_2(x, y)] + a_2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)] \\
&+ \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)] \sum_{m=1}^{\infty} b_{1m} \cos[m\phi_2(x, y)] \\
&= a_1 a_2 + a_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_{1m} \cos[m\phi_2(x, y)] + a_2 \sum_{n=1}^{\infty} b_{1n} \cos[n\phi_1(x, y)] \\
&+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} b_{1n} b_{1m} \cos[n\phi_1(x, y)] \cos[m\phi_2(x, y)]
\end{aligned}$$

该式子前三项为条纹本身携带的强度，对应着数字莫尔三维测量需要去除的高频噪声。而第四项可以使用积化和差，计算出差频和和频率两项即为莫尔条纹所携带的信息。而这一信息来源于物体高度扭曲了投影条纹，使得原本等间距，零夹角的两幅条纹出现了周期变化，夹角变化。从莫尔条纹反推恢复物体高度是下一小节三角测量法，以及本论文的重点。

## 2.2 三角测量法

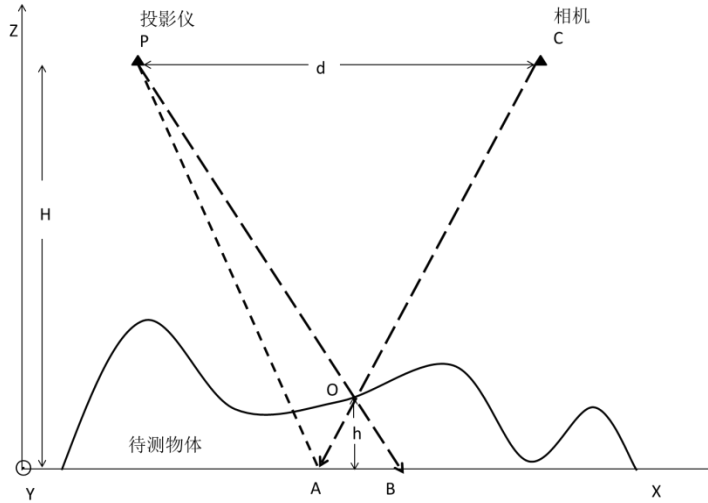


图 6 三角测量法几何关系

在数字莫尔三维测量中，莫尔条纹是由经不同高度待测表面扭曲后的条纹图样和相同周期条纹图样叠加而产生。所以由此生成的莫尔条纹含有物体的高度信息。而利用三角测量法的数学模型可建立待测面高度和投影仪，相机和被测点连线延长线与参考平面两交点之间的条纹相位差之间的联系。

如上图所示，在相机C和投影仪P(以下称C-P平面)和参考平面(坐标系XY平面)平行，以及投影仪投影光线和参考平面垂直的前提条件下，可根据几何条件计算出待测点O处高度h和A、B两点相位差之间的关系。根据，

$$\Delta ABO \sim \Delta CPO$$

可得，

$$\frac{h}{H-h} = \frac{|AB|}{d}$$

又由A、B两点相位和投影后周期长度L的关系可得，

$$|AB| = \frac{\varphi_B - \varphi_A}{2\pi} L = \frac{\varphi_{BA} L}{2\pi}$$

带入 T0-D0 式，可得出待测点高度和相位之间的对应关系，

$$h = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\varphi_{BA}}}$$

其中相机和投影仪之间距离为d，C-P平面到参考平面之间的距离为H，投影

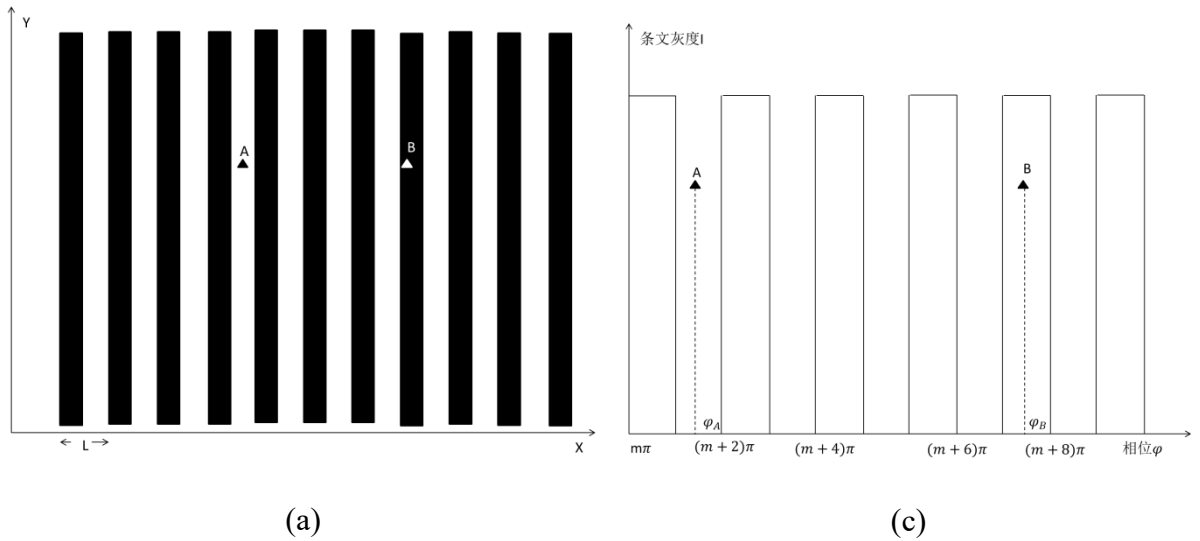


图 7 利用 AB 两点相位差得出被测点高度：a) 参考平面单独投影条纹 AB 相对位置；b) 条纹灰度和 X 轴各点相位关系

条纹在参考平面上的周期L以及A、B两点之间的相位差，在实际测量过程中，并不是直接作为几何参数带入 T0-D0 式[8]。实际测量过程的高度和相位关系在下一章节实物系统校准中会详细讨论。

### 3 实物系统校准

前一章首先定性分析了莫尔条纹和物体高度信息的对应，之后通过三角测量法的几何关系得出单一待测点高度和参考平面对应亮点高度差之间的关系。该关系式子含有实际测量过程中难以精确得出的几何参数。为了解决这一问题，本章将拓展上一章得到的相位-高度关系，并根据前人文献和数学工具，具体归纳实际测量系统校准的过程，最后利用仿真环境演示。

#### 3.1 非线性校准原理

2007 年加拿大学者根据 T0-D0 2.2-3 中单一被测点的高度-相位差关系，提出了非线性和线性校准两种方法，以下是非线性校准的具体推导过程[17]。在 T0-D0 2.2-3 中，

$$h = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\varphi_{BA}}}$$

$\varphi_{BA} = \varphi_B - \varphi_A$ ，如图-7，根据费马定理，测量过程位于O点的投影条纹，应与去除被测物体位于B点的投影条纹是同一级次。因此，B，O两点的相位 $\varphi_B = \varphi_O$ 。

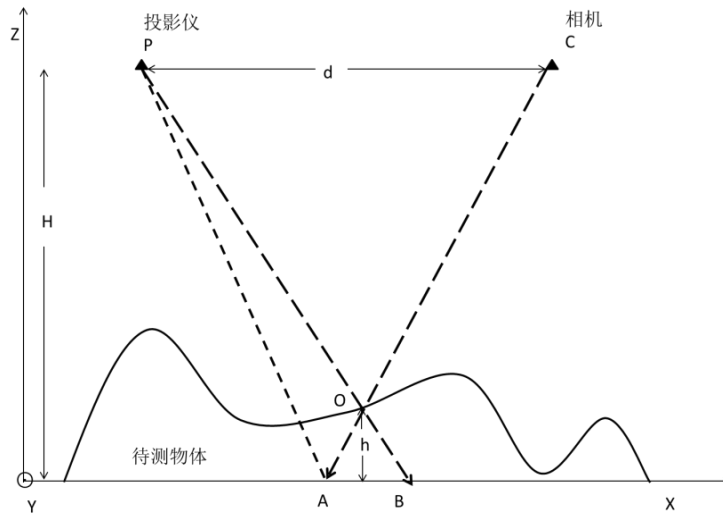


图 7 O，B 两点相位等同

则， $\varphi_{BA} = \varphi_O - \varphi_A$ ，将此关系带入 T0-D0 2.2-3 中，可将该式关系变换为被测点高度与被测点相位和相机-被测点延长线与参考平面交点相位之差的关系。

考虑被测点不位于 $X-Z$ 平面的情况，即被测点位于纸面外或纸面内的情况。假设被测点 $X-Y$ 坐标为 $(x_0, y_0)$ 。如下图，

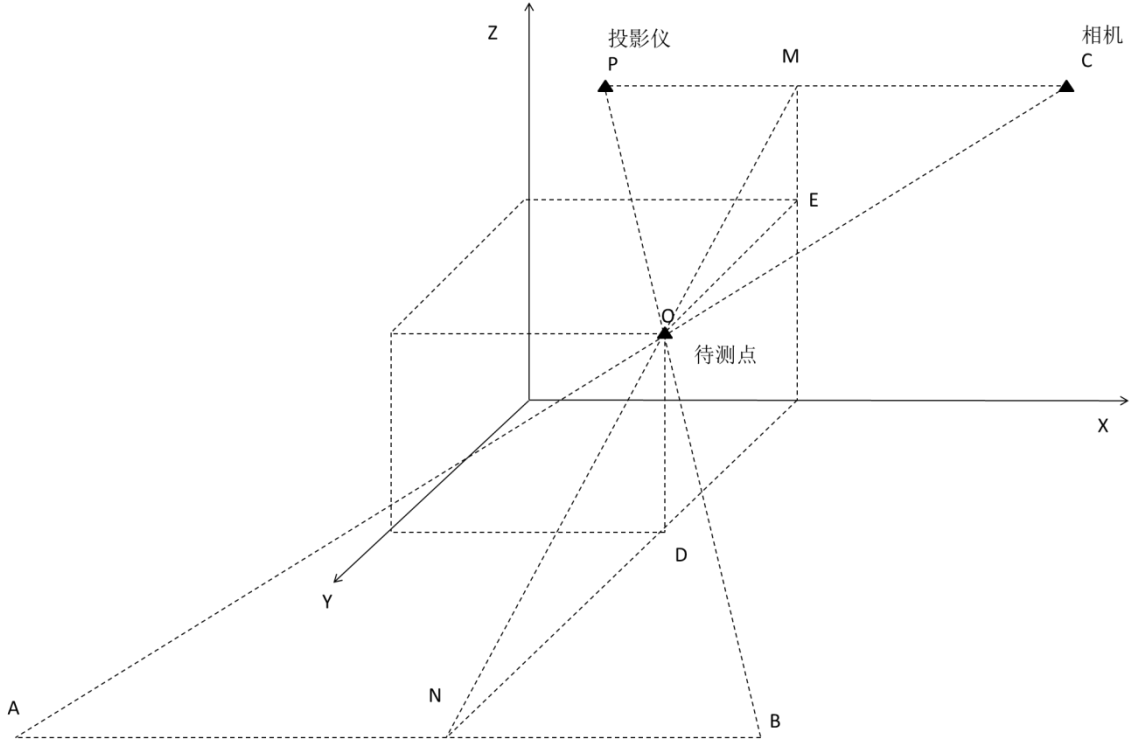


图 8 被测点在  $X-Z$  平面之外

在上图中同样存在 $\triangle ABO \sim \triangle CPO$ 。则，

$$\frac{|CP|}{|AB|} = \frac{d}{L\Delta\varphi(x_0, y_0) / 2\pi} = \frac{|MO|}{|NO|}$$

又 $\triangle ODN \sim \triangle MEO$ ，

$$\frac{|MO|}{|NO|} = \frac{|ME|}{|OD|} = \frac{H - h(x_0, y_0)}{h(x_0, y_0)}$$

由上两式可得

$$h(x_0, y_0) = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x_0, y_0)}}$$

由于上式对任何被测点均成立，考虑整个待测平面，可有

$$h(x, y) = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x, y)}}$$

将上式整理得，

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{\frac{2\pi d}{LH}h(x,y)}{1 - \frac{1}{H}h(x,y)}$$

该式描述了相位分布和高度分布的非线性关系。在非线形校准中，需要确定的参数如下。

$$m = \frac{2\pi d}{LH}$$

$$n = \frac{1}{H}$$

$m$ 和 $n$ 均和测量装置的几何参数有关，但通过最小二乘方法处理已知 $h(x,y)$ 和 $\Delta\varphi(x,y)$ 的数据，可以得出最大似然系数 $m$ 和 $n$ 的具体数值[17]，从而用于后续测量过程中，利用 TO-D03.1 式将相位分布转换为待测表面高度分布。

### 3.2 线性校准原理

在提出非线性校准的同一篇文献中，该学者提出了线性校准[17]，但线性校准在莫尔三维测量早期已有应用[18]。线性校准和非线性校准同样使用最小二乘法估计参数，但线性校准利用了近似关系，将相位-高度关系转变为线性方程。具体推导过程如下。

在 3.1 节中，高度相位关系为，

$$h(x,y) = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x,y)}}$$

当 $H \gg h$ 时，可将分母中的常数项忽略（该近似关系可参考附录-2 TO-D0 加链接）。整理得出，

$$h(x,y) = \frac{LH}{2\pi d}\Delta\varphi$$

即，

$$h(x,y) = K\Delta\varphi$$

系数  $K$  同样与测量系统的几何参数有关，可使用已知位置分布和相位分布的数据估计。

### 3.3 莫尔波长与相位-高度转换

3.2 大大简化了系统校准的数学解释和处理过程。为了进一步理解系统校准的远离，莫尔波长作为过渡变量被引入[8，19]。当投影平面垂直于投影方向靠近或

远离投影仪时，条纹会向上或向下移动。虽然该过程伴随着投影条纹的放大和缩小，但当条纹移动一个周期时，由于投影仪投影张角较大且条纹周期较小，可以近

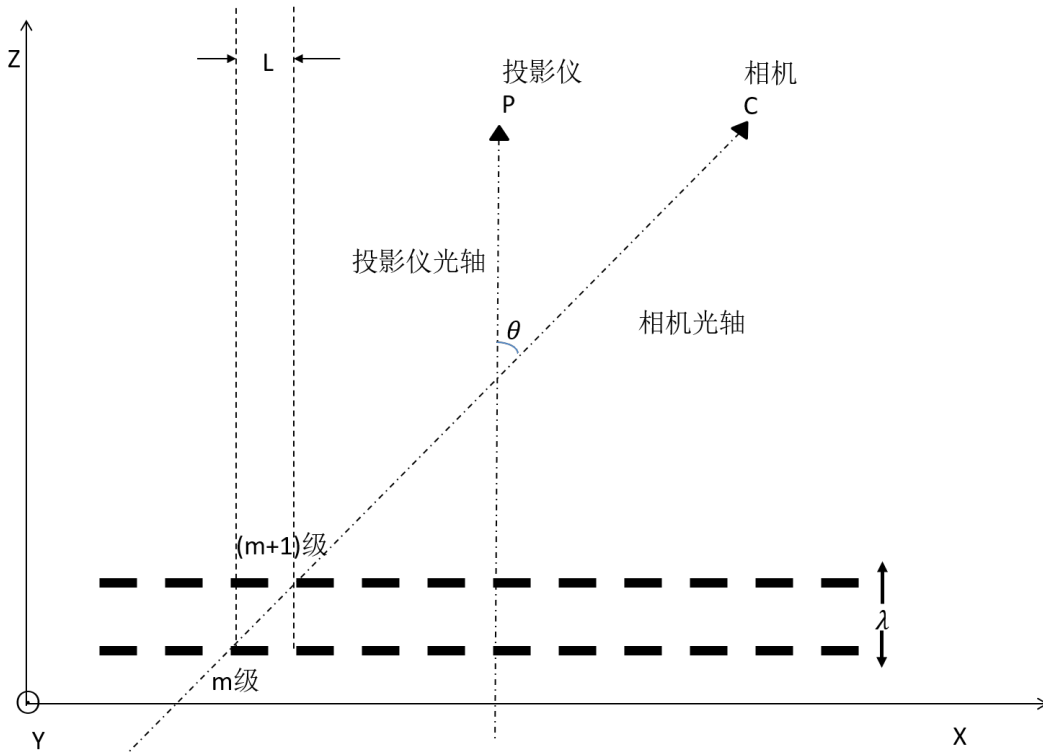


图 9 莫尔波长的计算

似认为莫尔条纹大小不变，此时投影平面移动的距离则为莫尔波长。

由图-9 几何关系得，在已知条纹周期和相机及投影仪光轴夹角 $\theta$ ，可得莫尔波长，

$$\lambda = \frac{L}{\tan\theta}$$

该公式表明物体高度每变化 $\lambda$ ，则莫尔条纹变化一个周期，其相位则变化 $2\pi$ 。则在相位-高度关系式（TO-DO）中，

$$h(x,y) = K\Delta\varphi$$

其中 $K = \lambda/2\pi$ ，即一个莫尔波长的高度变化，对应相位变化 $2\pi$ 。但该系数并不是常数，在投影条纹在高度变化其周期范围内，可以将 $K$ 看作常数。当高度变化更大时，投影仪对投射出的条纹图样的放大缩小作用，会使条纹周期发 $L$ 生变化。随着高度增加，条纹图样缩小，条纹周期减小，莫尔波长减小。因此，在线性系统校准时，需要针对不同周期，不同位置的数据，拟合得出针对单一频率的莫尔波长

随高度变化直线。

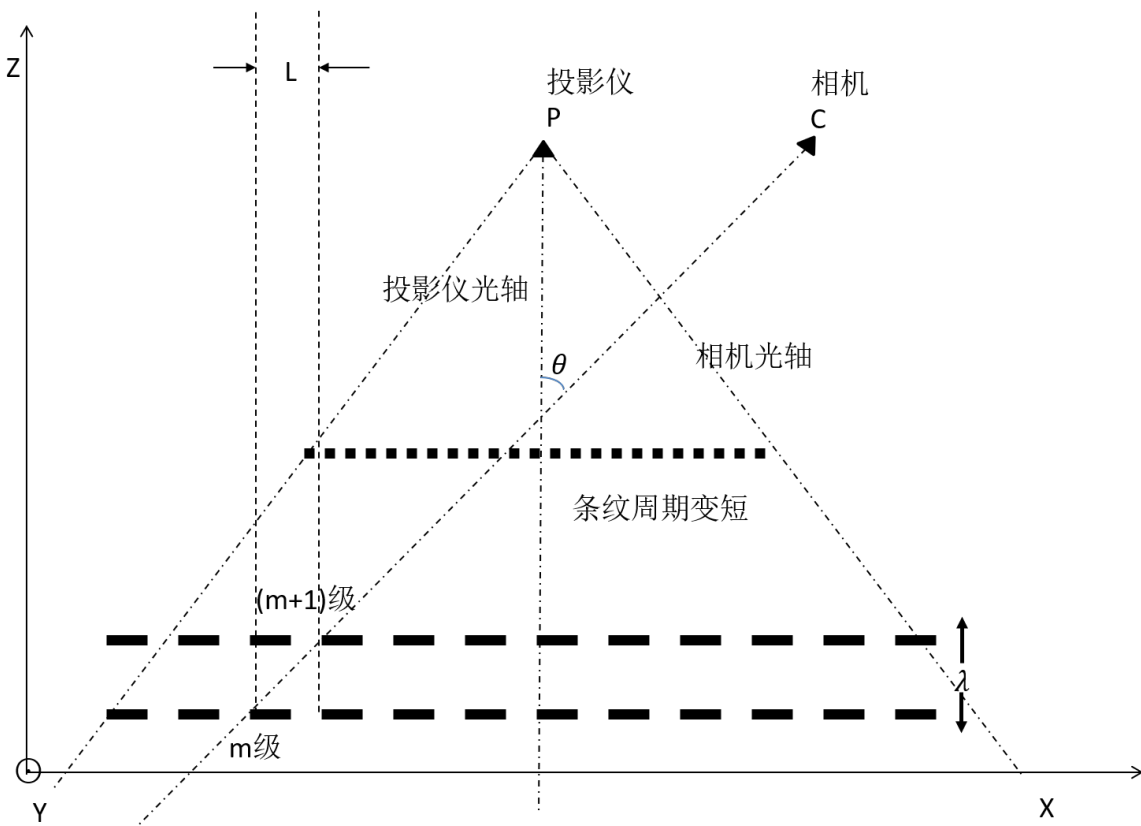


图 10 高度变化范围过大，条纹周期  $L$  减小

### 3.4 线性校准过程

### 3.5 仿真环境中系统校准演示



## 4 数字相移

## 5 高频载波滤波

## 6 相位提取展开

## 7 实验过程和结果

## 8 结论

## 参考文献

1. 蔡海云, 三坐标机复杂曲线曲面轮廓度自适应评价方法的研究及软件开发. 2000, 西安理工大学.
2. 冯建, 纳米三坐标机之高精度微型环境箱研制. 2016, 合肥工业大学.
3. 刘佳, 三坐标测量机在数控机床配件检测中的应用初探. 内燃机与配件, 2019(04): p. 75-76.
4. 黄文周 and 孙福英, 三坐标测量机在轴承端盖质量检测中的应用. 时代农机, 2019. **46**(02): p. 54+59.
5. 李托拓, 胡锋, and 耿征, 基于结构光的三维成像技术. 网络新媒体技术, 2012. **1**(01): p. 22-33.
6. Bell, T. and S. Zhang, *Toward superfast three-dimensional optical metrology with digital micromirror device platforms*. Optical Engineering, 2014. **53**(11): p. 112206.
7. 曹向群 and 黄维实, 莫尔技术的现状和展望. 光电工程, 1990(03): p. 48-56.
8. Mohammadi, F., *3D optical metrology by digital moiré: Pixel-wise calibration refinement, grid removal, and temporal phase unwrapping*. 2017.
9. Lawman, S., et al. *Applications of optical coherence tomography in the non-contact assessment of automotive paints*. in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*. 2017. International Society for Optics and Photonics.
10. 丁一飞, 数字光栅投影测量关键技术研究. 2016, 合肥工业大学.
11. Warden, R. and S. Al Ratrout, *Moiré Contours for Documenting Petroglyphs at Montezuma Castle*. 2005.
12. Gorthi, S.S. and P. Rastogi, *Fringe projection techniques: whither we are?* Optics and lasers in engineering, 2010. **48**(ARTICLE): p. 133-140.
13. 朱丽君, 数字莫尔条纹三维面形测量技术研究. 2016, 山东大学.
14. Nishijima, Y. and G. Oster, *Moiré patterns: their application to refractive index and refractive index gradient measurements*. JOSA, 1964. **54**(1): p. 1-5.
15. Amidror, I. and R.D. Hersch, *Mathematical moiré models and their limitations*. Journal of Modern Optics, 2010. **57**(1): p. 23-36.
16. Creath, K. and J. Wyant, *Moiré and fringe projection techniques*. Optical shop testing, 1992. **2**: p. 653-685.
17. Jia, P., J. Kofman, and C.E. English, *Comparison of linear and nonlinear calibration methods for phase-measuring profilometry*. Optical Engineering, 2007. **46**(4): p. 043601.
18. Takasaki, H., *Moiré topography*. Applied optics, 1970. **9**(6): p. 1467-1472.
19. Dirckx, J.J. and W.F. Decraemer, *Automatic calibration method for phase shift shadow moiré interferometry*. Applied optics, 1990. **29**(10): p. 1474-1476.

## 致谢

本论文是在指导老师袁自均副教授的悉心指导和严格要求下完成的。袁老师不仅启发性地引导我推导本研究的数学原理，还鼓励我实践和理论结合，多关注实验室实物测量平台对后端处理算法的要求。同时，袁老师实验室的研究生严绍华学长也提供了许多有价值的讨论。

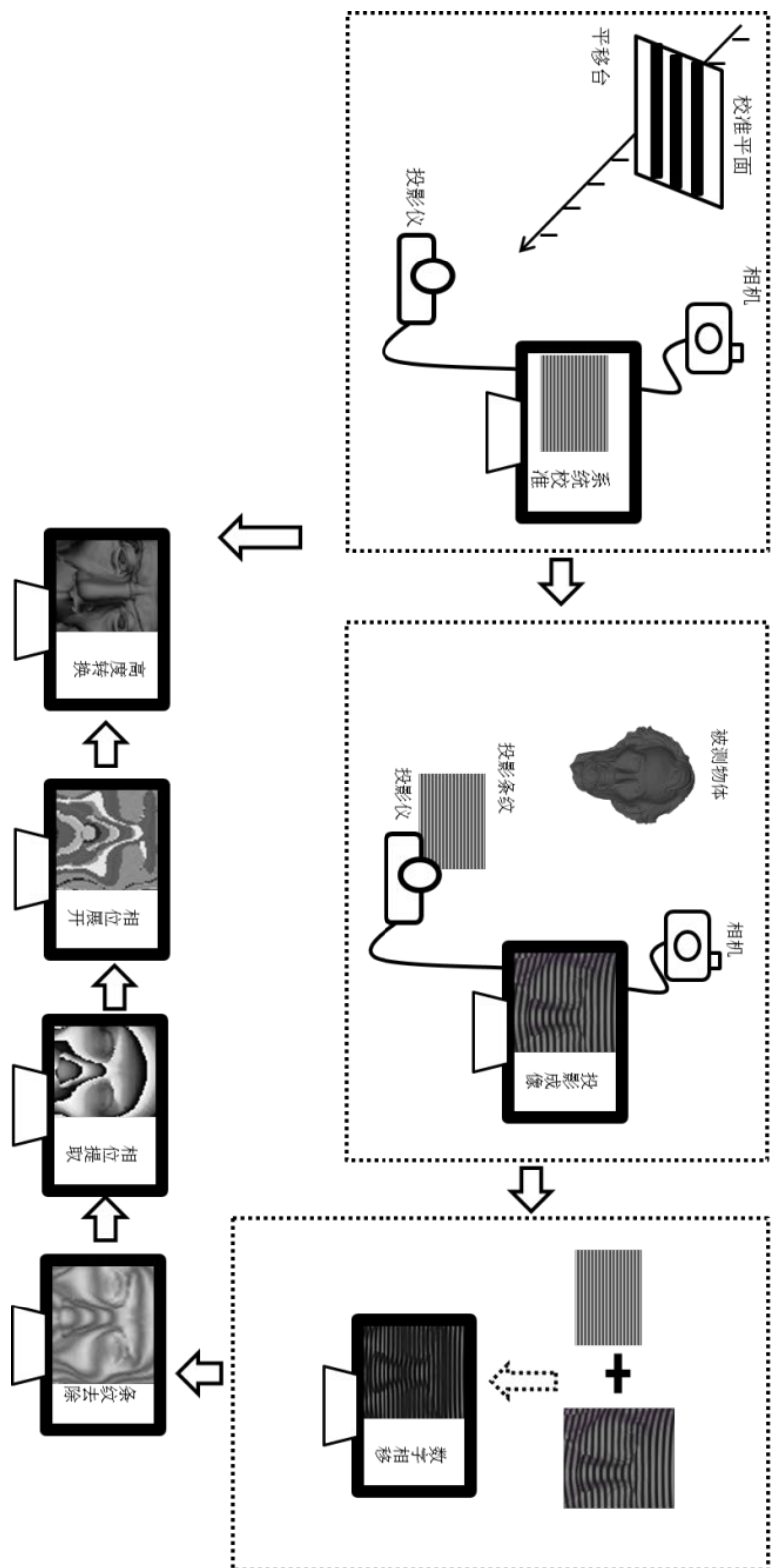
特别鸣谢，光学工程系系主任高位清老师。高老师在论文写作，答辩 ppt 制作方面，给出了宝贵且实用的建议。

此外，向本论文所采用的开放图片作者表示由衷的谢意。没有你们的慷慨，本论文不可能如此方便的解释所探讨的话题。

作者：张凡

2019 年 05 月 25 日

## 附录





## 附录-2

3.2 节中将

$$h(x, y) = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x, y)}}$$

近似为，

$$h(x, y) = \frac{LH}{2\pi d} \Delta\varphi$$

使用了如下推导过程，

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x, y)}} \\ &= \frac{1}{1/H + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x, y)H}} \end{aligned}$$

当  $H \gg h$  时， $1/H \approx 0$ ，故可以舍去。整理得出，

$$h(x, y) = \frac{LH}{2\pi d} \Delta\varphi$$

i 图 3-a 来自浙江先临三维科技有限公司产品网站，且属于公有领域。来源网址：  
[http://www.shining3d.com/digitizer\\_detail-4861.html](http://www.shining3d.com/digitizer_detail-4861.html)

ii 图 3-b 来自国家公园服务网站，由夏洛特哈特拍摄，且已由国家公园服务网站验证属于公有领域。来源网址：<https://www.nps.gov/media/photo/gallery-item.htm?pg=1830555&id=5AF7C624-155D-451F-67C6FA34A365D0F9&gid=FF903CDA-155D-451F-676E57B9B109F2AD>

iii 图 4-a, b, c 来自于维基百科莫尔条纹词条，可直接使用。来源网址：  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9\\_pattern](https://en.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9_pattern)