|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **学 号：** | **2014213282** | **密 级：** |  |



**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 techonology restores the digital recordings of the object height information by processing the data collected from various sensors, such as CCDs and magnetic proximity swtiches, which are seleted accoding to different tasks and processing algortihtms. Recently, it has seen tremendous efforts on commerilizing the technology for purposes covering archeological 3D Scan, Reverse Engneering, Indurtrial Inspection and Medical Imaging.

This thesis focuses on one of the most promising solution 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 mathmetical relation between the Morie Pattern and the height information of the object can be affirmed since the gemometrical parameters form the camera, the projector and the object can easily be attained in sitmulation. Third, by the convience fo simulation, the algorithms for processing images captured in the Digital Morie 3D method, is analyzied and optimized for the end. Finally, the apposite algorithms will be recommended by comparing its algorithmical complexity and errors.

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

目 录

[1 绪论 1](#_Toc9283406)

[1.1 三维测量方法对比 1](#_Toc9283407)

[1.1.1 三坐标测量机 2](#_Toc9283408)

[1.1.2 光学三维测量 2](#_Toc9283409)

[1.2 数字莫尔三维测量方法过程 3](#_Toc9283410)

[1.3 数字莫尔三维测量方法的应用 4](#_Toc9283411)

[2 相位-高度对应关系 6](#_Toc9283412)

[2.1 莫尔条纹产生原理 6](#_Toc9283413)

[2.2 三角测量法 9](#_Toc9283414)

[3 实物系统校准 11](#_Toc9283415)

[3.1 非线性校准原理 11](#_Toc9283416)

[3.2 线性校准原理 13](#_Toc9283417)

[3.3 莫尔波长与相位-高度转换 13](#_Toc9283418)

[3.4 线性校准过程 15](#_Toc9283419)

[3.5 仿真环境中系统校准演示 15](#_Toc9283420)

[4 数字相移 16](#_Toc9283421)

[5 高频载波滤波 17](#_Toc9283422)

[6 相位提取展开 18](#_Toc9283423)

[7 实验过程和结果 19](#_Toc9283424)

[8 结论 20](#_Toc9283425)

[参考文献 21](#_Toc9283426)

[致谢 22](#_Toc9283427)

[附录 23](#_Toc9283428)

**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）

TO-DO: 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. 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. 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. 光学三维测量

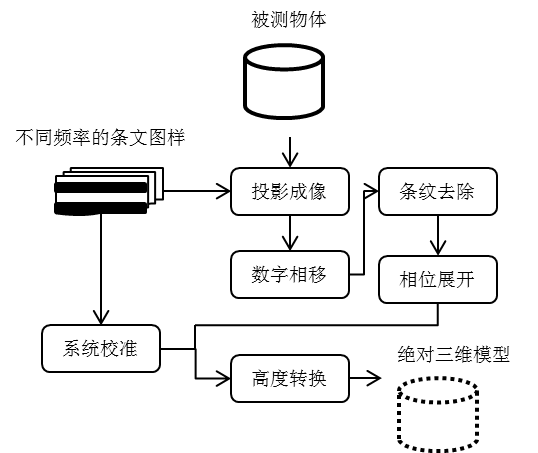
与三坐标测量机方案所采取的接触式，机械式的测量方式不同，光学三维测量方案将作带有一定调制的图样投射到待测表面，采集图像后，利用电脑后端处理算法，还原被测表面高度信息。目前光学三维测量的成像方法包括，条纹调制，格状调制，连续变化函数调制和多次投影法[5]。根据使用的成像方法，设计方案和测量目的不同，选择的设备和后端处理算法也不同。例如，属于多次投影调制的数字莫尔三维测量方法在实物测量过程中，在测量普通待测物体时，仅仅需要普通相机和投影仪即可，但当待测物体在移动速度较快时，则需要使用高速相机和能较高刷新频率的投影仪[6]。但总体而言，光学三维量程相对较大，设备简单，成本低廉，可测量柔软和移动中物体。

图 1数字莫尔三维测量流程图

* 1. 数字莫尔三维测量方法过程

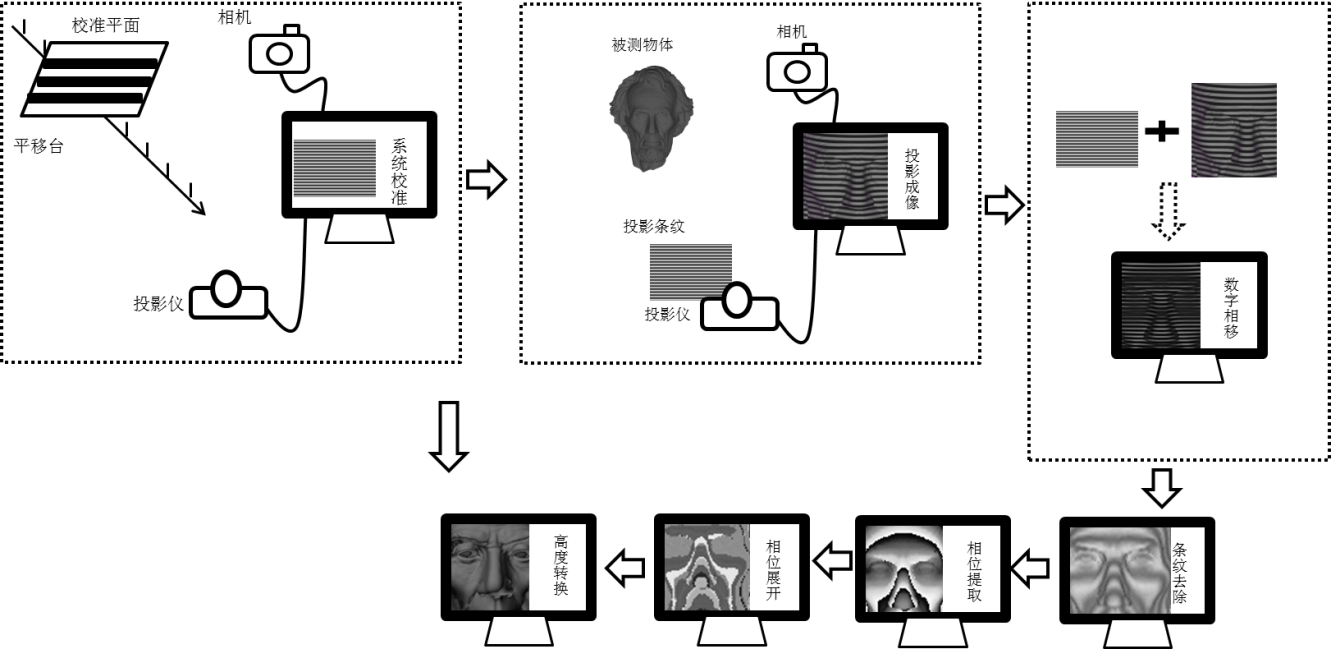
数字莫尔三维测量将传统莫尔测量的产生莫尔图样和由莫尔图样得出所测表面三维模型的过程转移到计算机处理。在传统莫尔测量方法中， 需要投影光栅和参考光栅重合形成对应等高线的莫尔图样[7]。而在数字莫尔测量方法中，投影光栅被投影仪的数字光处理芯片代替，直接将莫尔图样投影到被测物体上，然后由数码相机的CCD传感器捕捉图片，最后在利用电脑程序，将和投影条纹同频率但是不同初始相位的条纹图样重合，形成莫尔条纹。使用后端处理算法叠加条纹和被物体高度信息扭曲的条纹图样，产生莫尔条纹的过程，称为数字相移。进过数字相移得到的莫尔图样，不仅包含有我们需要的等高线，还包括调制物体高度信息的高频条纹。为了得到单一高线信息，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。

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

* 1. 数字莫尔三维测量方法的应用

(b)

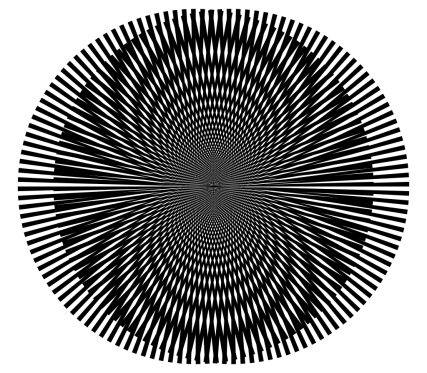
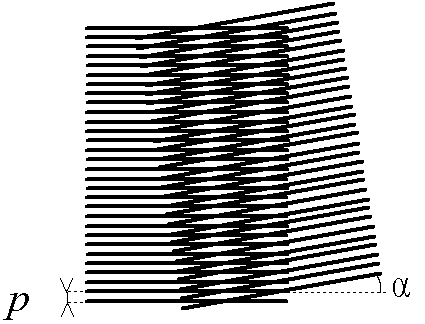
(a)

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[[1]](#endnote-1)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[[2]](#endnote-2)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]。

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

1. 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]。

* 1. 莫尔条纹产生原理

(c)

(b)

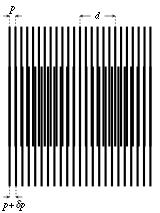


图 4 莫尔条纹产生方式：a)不同周期；b)成角度；c)不完全重合

(a)

莫尔条纹[[3]](#endnote-3)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，间隔和等间隔光栅B，间隔以角度重合。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，

将DE，CD，CE均用和等表示，约分化简可得，

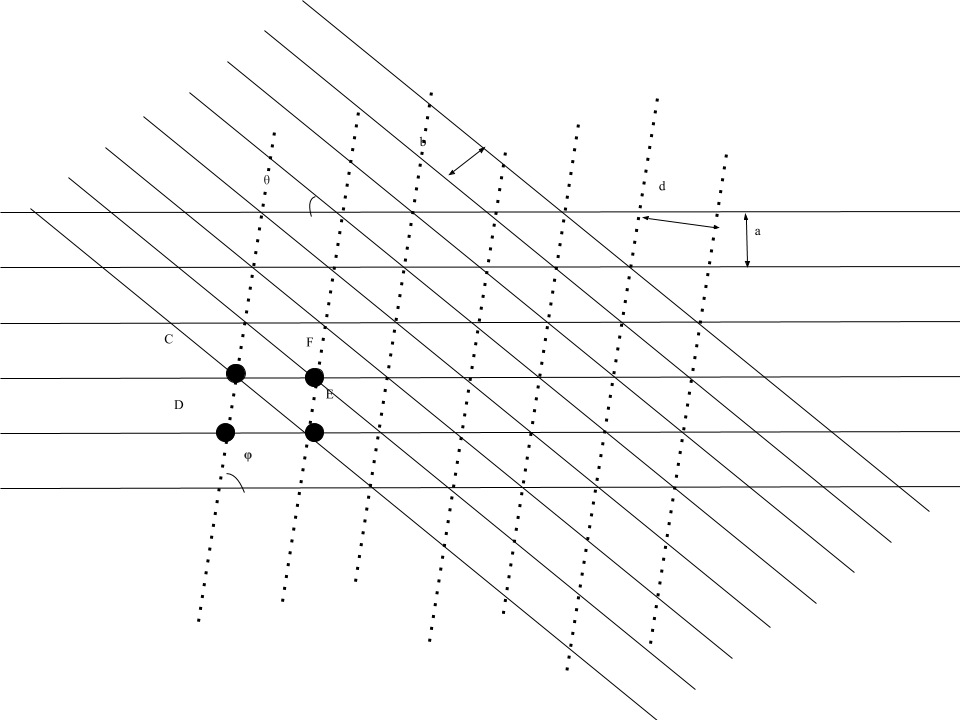
又可由，

图5光栅重叠产生莫尔条纹

可得，

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。当时，即使用相同间隔光栅重叠时,可得，

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解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，是使用傅立叶级数和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。

在上式中，对应表二中正弦函数中，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 |  |  |
| 锯齿波 |  |  |
| 三角波 |  |  |

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。

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文所携带的信息。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。

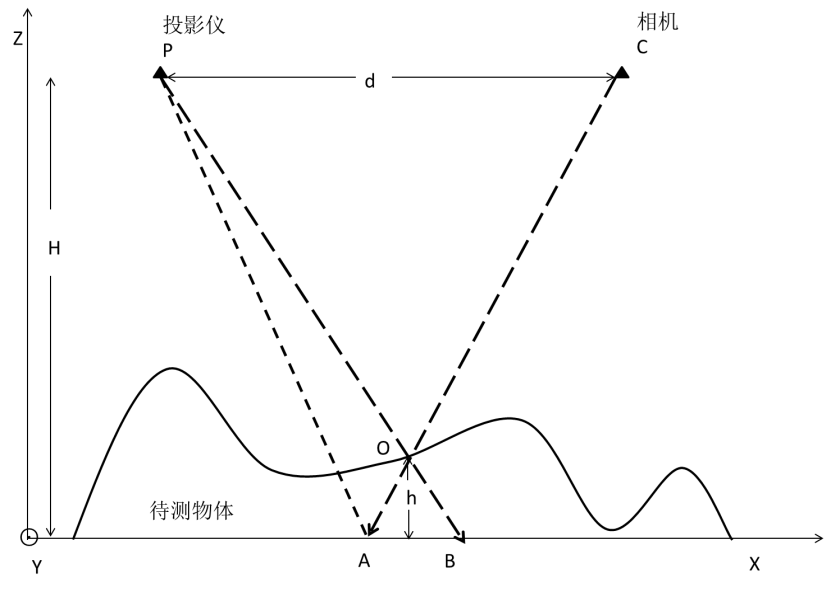
* 1. 三角测量法

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文含有物体的高度星系。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，在相机和投影仪(以下称)和参考平面（坐标系）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处高度和两点相位差之间的关系。根据，

可得，

又由两点相位和投影后周期长度L的关系可得，

带入TO-DO式，可得出待测点高度和相位之间的对应关系，

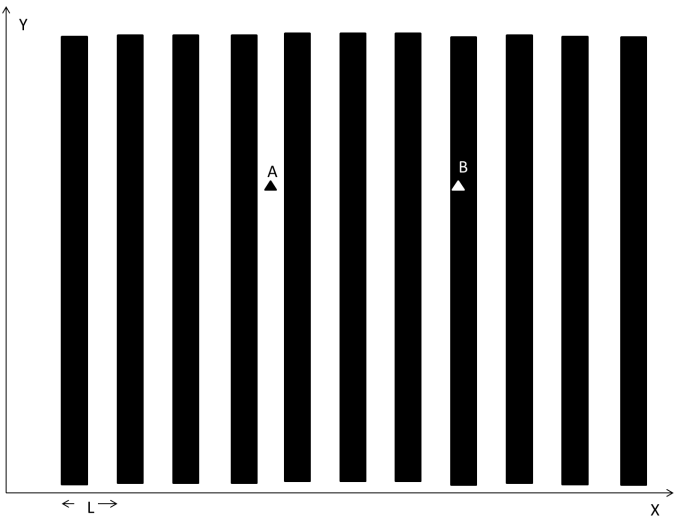
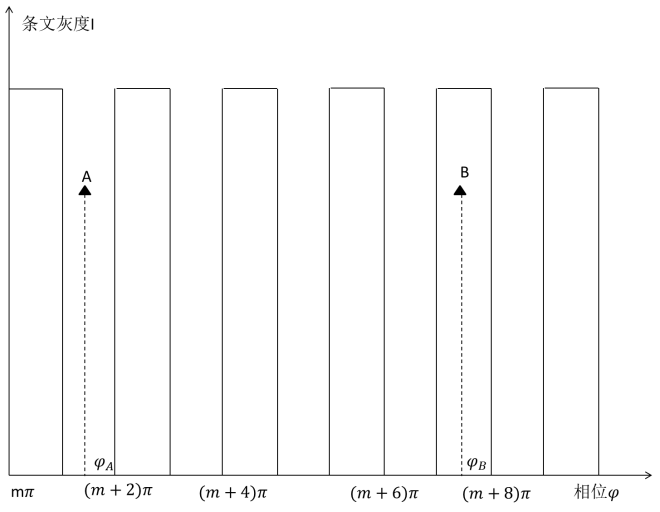
其中相机和投影仪之间距离为，到参考平面之间的距离为H，投影条纹在参考平面上的周期以及两点之间的相位差，在实际测量过程中，并不是直接作为几何参数带入TO-DO式[8]。实际测量过程的高度和相位关系在下一章节实物系统校准中会详细讨论。

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

(c)

(a)

1. 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。

* 1. 非线性校准原理

2007年加拿大学者根据 TO-DO 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TO-DO 2.2-3中，

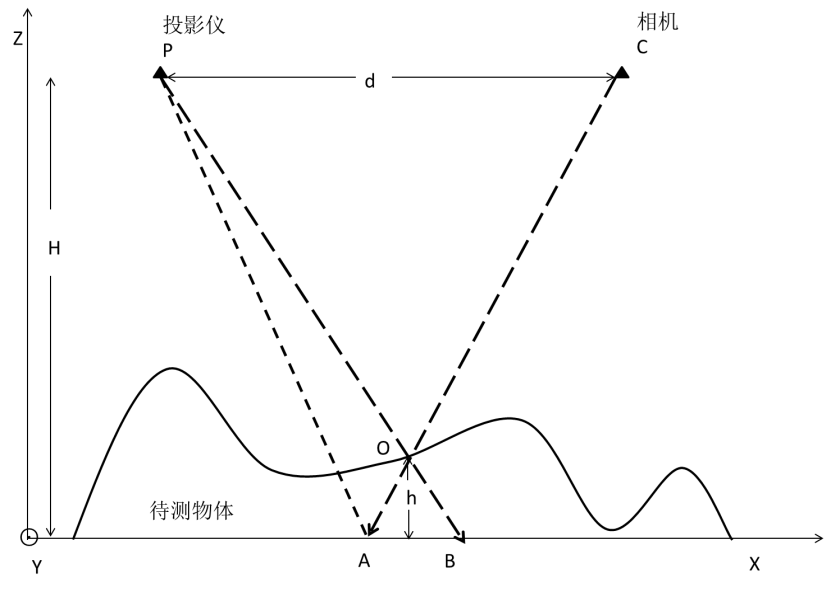
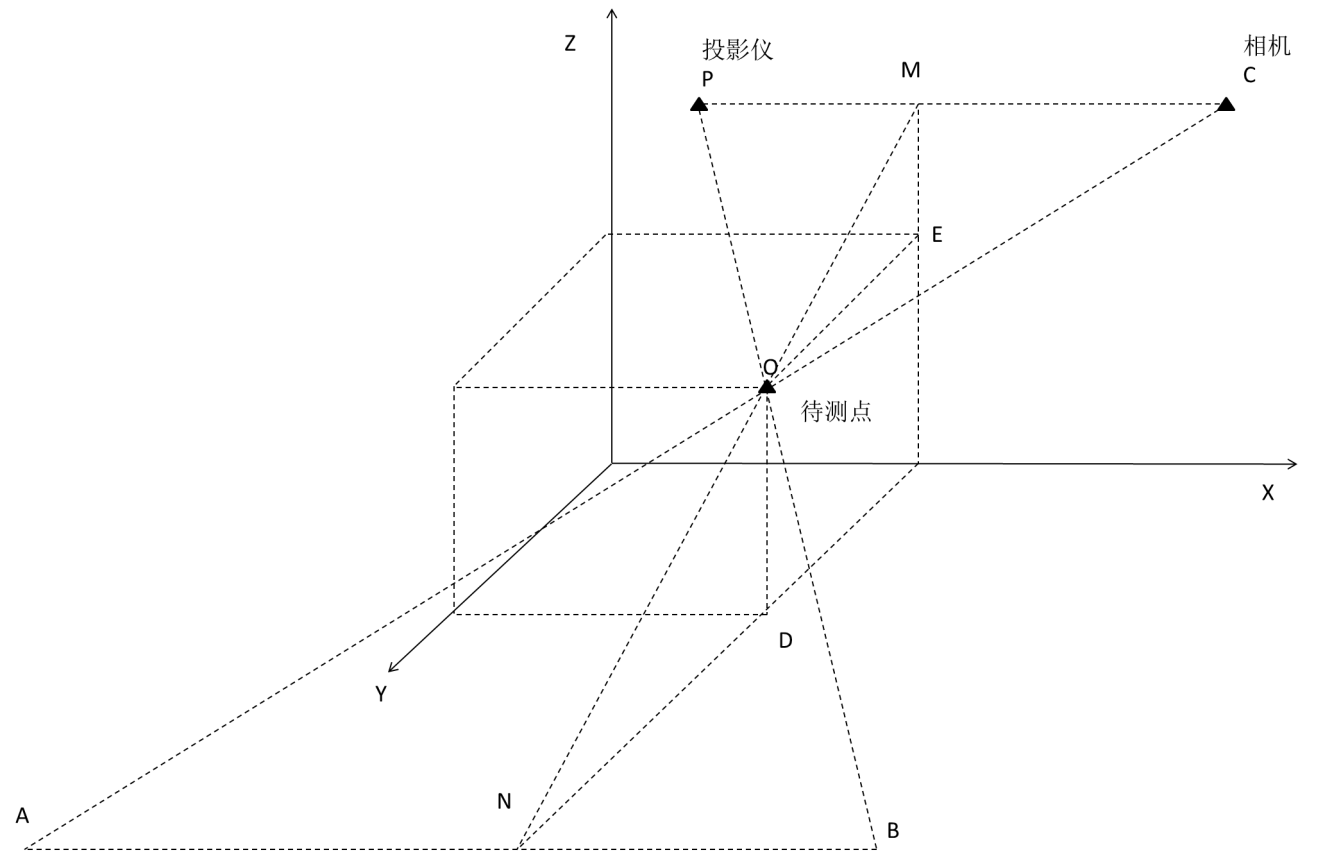
，如图-7，根据费马定理，测量过程位于点的投影条纹，应与去除被测物体位于B点的投影条纹是同一级次。因此，两点的相位。则，，将此关系带入TO-DO 2.2-3中，可将该式关系变换为被测点高度与被测点相位和相机-被测点延长线与参考平面交点相位之差的关系。

图 7 O，B两点相位等同

考虑被测点不位于平面的情况，即被测点位于纸面外的情况。假设被测点。如下图，

在上图中同样存在。则，

图8被测点在X-Z平面之外

又，

由上两式可得

由于上式对任何被测点均成立，考虑整个待测平面，可有

将上式整理得，

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

和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和的数据，可以得出最大似然系数和的具体数值[17]，从而用于后续测量过程中，利用TO-DO3.1式将相位分布转换为待测表面高度分布。

* 1. 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，但线性校准了利用了近似关系，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，

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

即，

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。

* 1. 莫尔波长与相位-高度转换

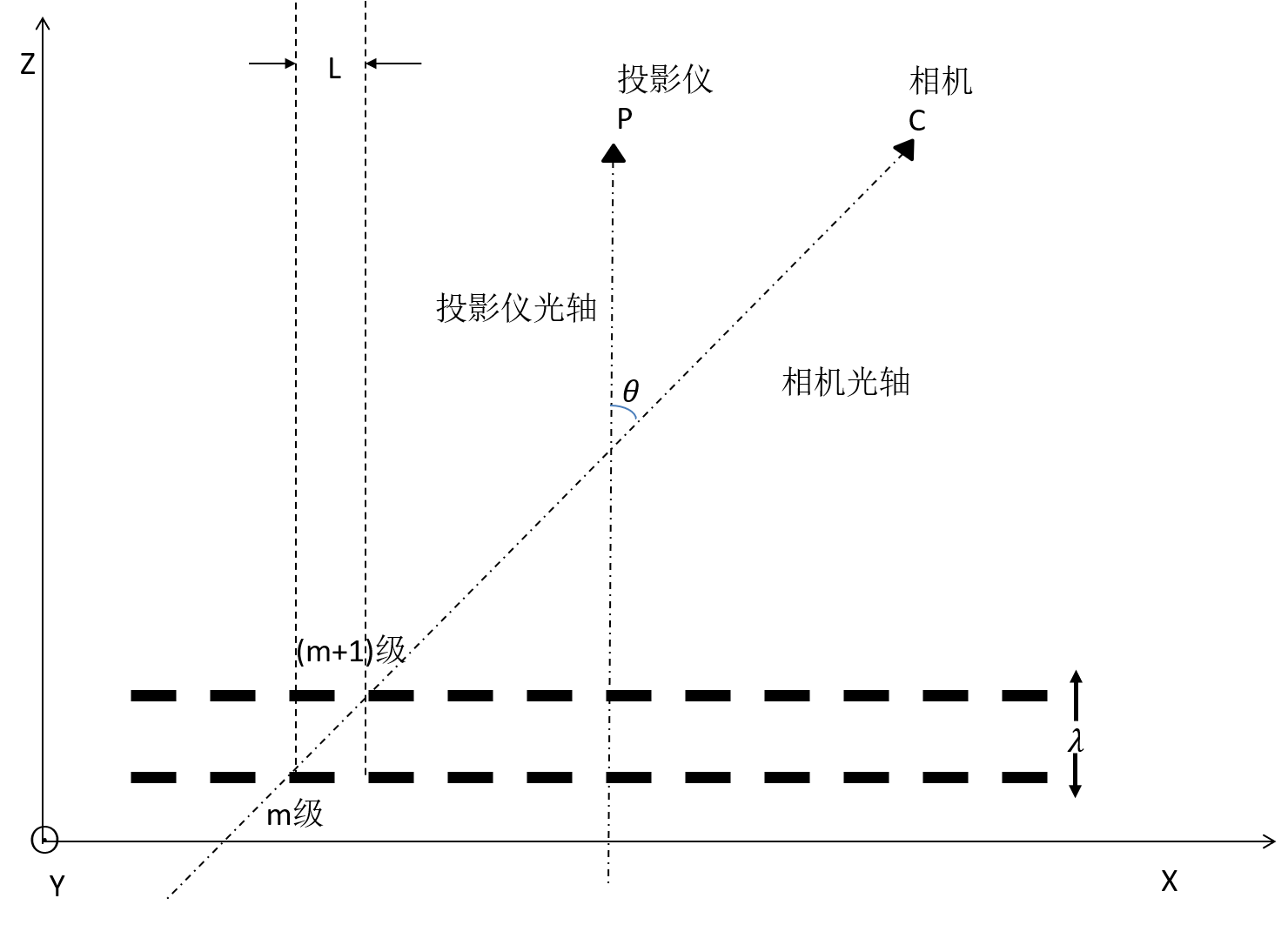
3.2大大简化了系统校准的数学解释和处理过程。为了进一步理解系统校准的远离，莫尔波长作为过渡变量被引入[8, 19]。当投影平面垂直于投影方向靠近或远离投影仪时，条纹会向上或向下移动。虽然该过程伴随着投影条纹的放大和缩小，但当条纹移动一个周期时，由于投影仪投影张角较大且条纹周期较小，可以近似认为莫尔条纹大小不变，此时投影平面移动的距离则为莫尔波长。

图 9莫尔波长的计算

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，可得莫尔波长，

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

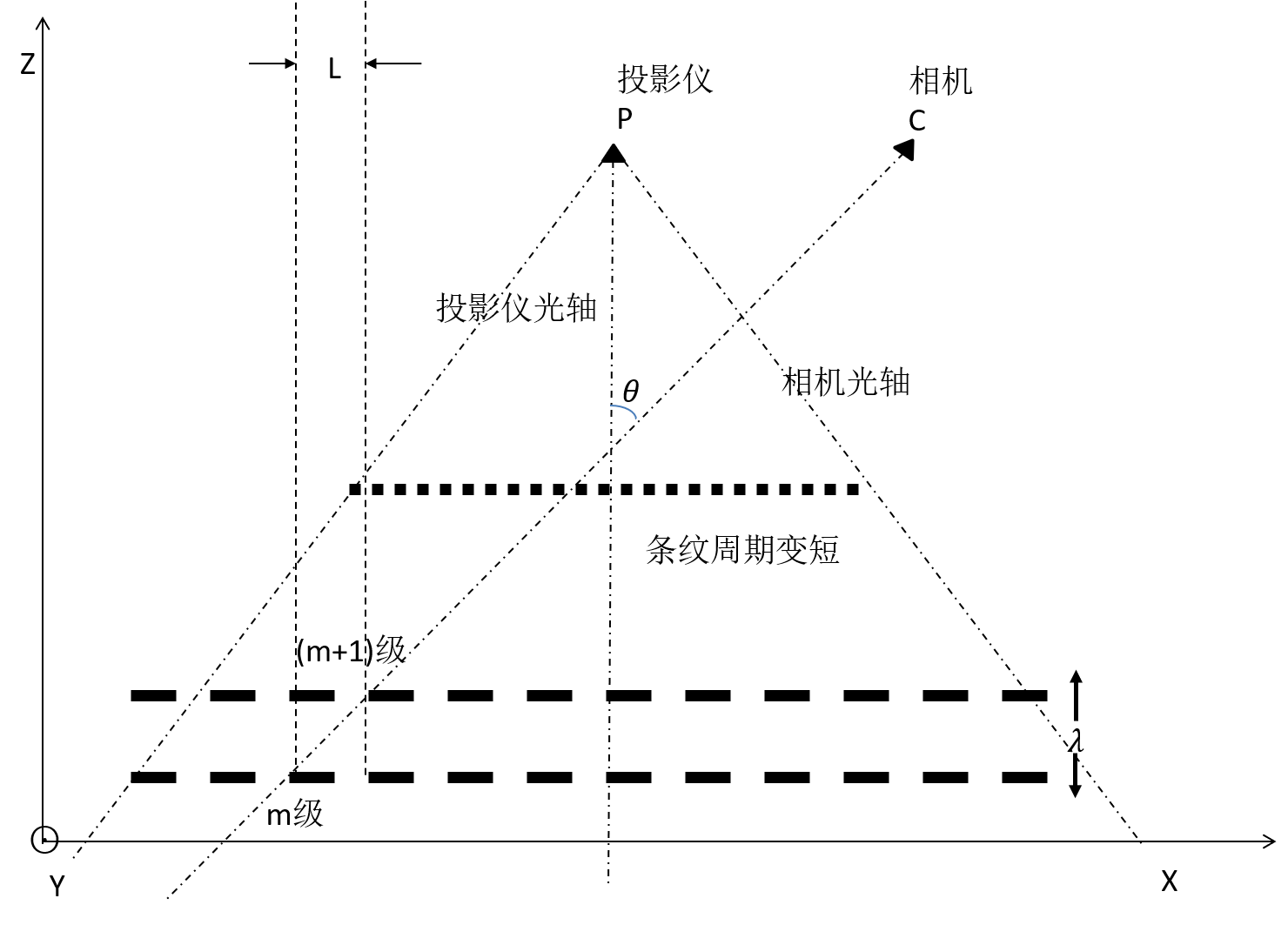
其中，即一个莫尔波长的高度变化，对应相位变化。但该系数并不是常数，在投影条纹在高度变化其周期范围内，可以将K看作常数。当高度变化更大时，投影仪对投射出的条纹图样的放大缩小作用，会使条纹周期发L生变化。随着高度增加，条纹图样缩小，条纹周期减小，莫尔波长减小。因此，在线性系统校准时，需要针对不同周期，不同位置的数据，拟合得出针对单一频率的莫尔波长随高度变化直线。

图 10高度变化范围过大，条纹周期L减小

* 1. 线性校准过程

为了建立被测面高度分布和相位分布精准对应关系，需要建立莫尔波长和高度的对应关系，然后使用适合物体高度分布的莫尔波长完成相位-高度转换[8]。因此线性校准需要在不同已知高度位置，根据相位信息和已知高度信息，拟合出莫尔波长和高度的线性变化关系。然而又由于后期相位展开所需要两个或三个莫尔波长不同的相位图，且对于同一测量物体有限的高度变化范围内，需通过不同条纹周期产生不同莫尔波长，线性系统校准过程需要针对不同条纹，在不同已知高度位置，完成相位-高度线性关系的拟合。以下是根据文献[8]提出的线性校准步骤和具体测量要求，可应用与实物测量系统的系统校准过程。

1. 为了同时满足测量尺寸较大和较小的待测物体，确定测量范围为，且采用的投影条纹的相对周期[[4]](#footnote-1)分别为6，8，10，12，18像素。
2. 在范围内，以0.5mm为间隔，取500个位置，并分别在这500个位置，捕捉针对5个不同周期的条纹图样投影到平板上的图像，共2500张图像。
3. 利用数字相移和条纹去除，得出每一位置，每一周期的投影条纹的相位分布图。
4. 针对同一周期的投影条纹得到的相位图的某一像素点，标出像素点灰度与高度变化的数据点，并拟合得出该像素点灰度和高度变化的关系。
5. 针对（4）中得到的类正弦关系，将连续两个极大值高度之差作为远离投影仪-相机平面的极大值处，对应高度位置的莫尔波长。
6. 将（5），针对（4）中像素灰度和高度变化的类正弦关系的每组连续极大值，重负，得到该像素莫尔波长和其对应高度的数据，即

其中,为灰度极小处的级次，为第极大值处，位于图像处对应的高度，而

=

则为第处，位于图像处像素的莫尔波长。

1. 将（4）（5）（6）针对（4）中同一周期条纹得到的相位图的每一点像素重复，并将同一高度得到的莫尔波长针对不同位置像素点平均，得到该高度处，该周期条纹得到的莫尔波长。对于分辨率的相位图，
2. 将（7）中得到的高度-莫尔波长数据，拟合出线性关系，留作最后相位展开使用
3. 针对不同周期的条纹，重复（7）（8），并所得关系留作最后相位展开使用。

注意，在系统校准过程中，有两个前提假设。首先，假设我们可以将在已知高度位置的拍摄的图像成功转换为相位分布。其次，在物体的高度变化范围内可使用同一莫尔波长。前一个假设，是第4章和第5章讨论的重点。第二个假设，是第6章方法的目的。

* 1. 仿真环境中系统校准演示

由于系统校准需要使用实物测量系统，且假设位置取样个数，条纹周期个数的情况下，系统校准方法的时间复杂度为, 本论文仅讨论数字莫尔三维测量的后端图像处理。但可使用三维建模软件中的容易测量的几何参数，验证系统校准方法。

TO-DO

1. 数字相移

之前的讨论得出了相位分布和高度分布成线性关系。因此，为了三维重建被测面，计算出相位分布尤为重要。而计算相位分布需要使用数字相移和滤波两个过程。本章讨论了数字莫尔三维测量中，数字相移方法，这一关键步骤。首先，本章介绍相移条纹和物体高度扭曲后投影条纹叠加的强度分布公式以及相位反解公式；然后，本章根据该公式描述，解释具体程序；最后，本章分析了由数字相移得到的相位分布。

* 1. 数字相移原理

将条纹图样投影到待测物体表面后，捕捉到图像的强度分布函数为

其中，

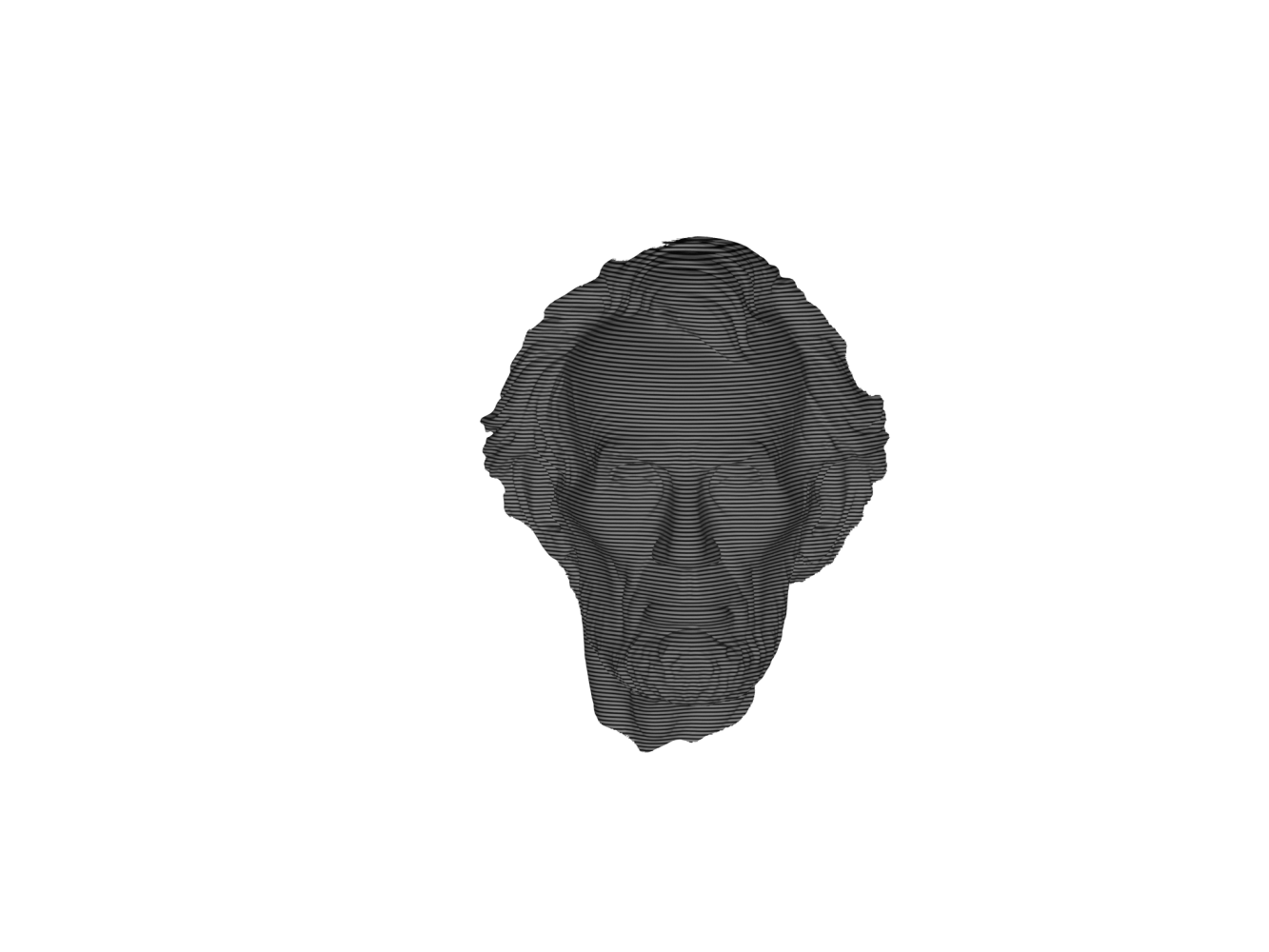
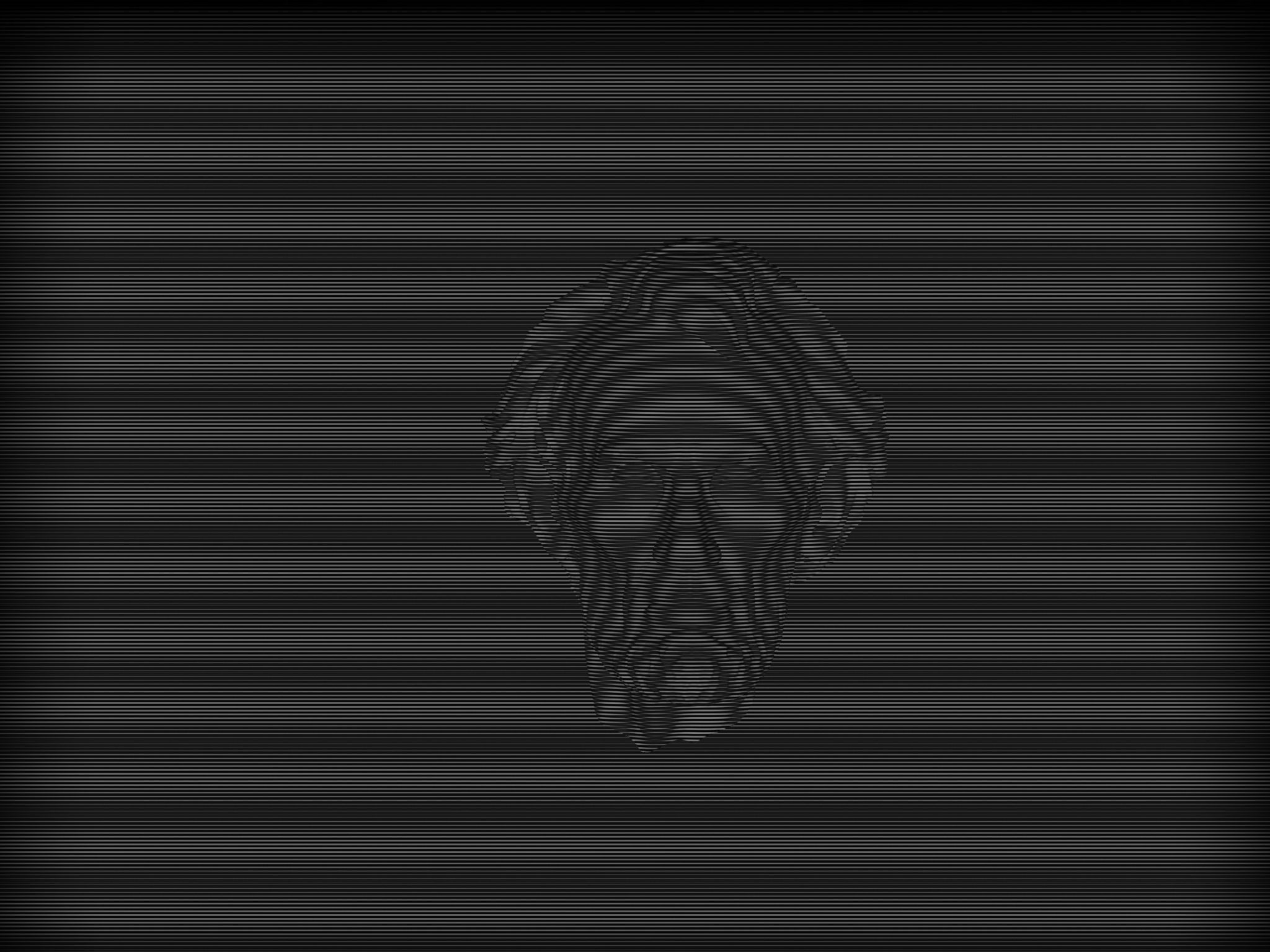
即最后的强度分布函数的相位为参考平面本身相位和由于物体高度变化而引起的相位变化之和。在第2，3章讨论中，已经得出含有物体高度信息，因此数字相移法，最终要为得出而服务。为背景光引起的灰度变化。

数字相移的做法是将一个同周期，但初始相位相差的条纹和所捕捉图像，灰度值相乘。具体推导过程如下。

在上式中，第一项是高频条纹，第二项中

相对于同样属于高频变化成分，对应这被物体高度扭曲的投影条纹。同时函数同样能引强度分布的突变。假设通过滤波，我们能从上式子中分离出低频成分如下。

则可通过相位提取公式[20, 21]，反解出。具体推导，详见第6章相位提取。

* 1. 结果分析

(c)

(b)

(a)

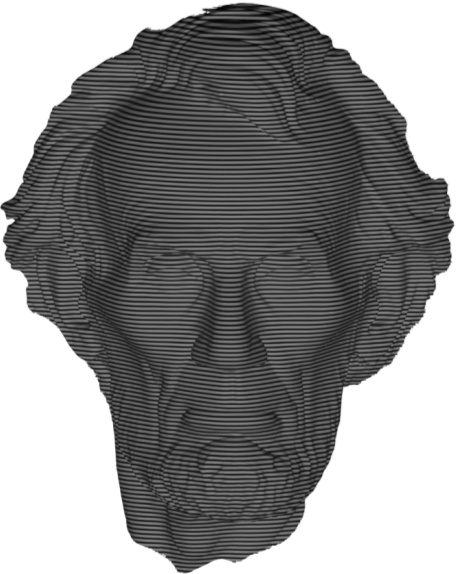
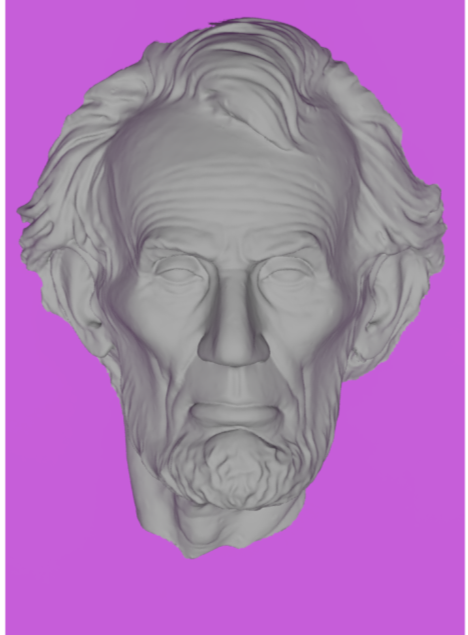
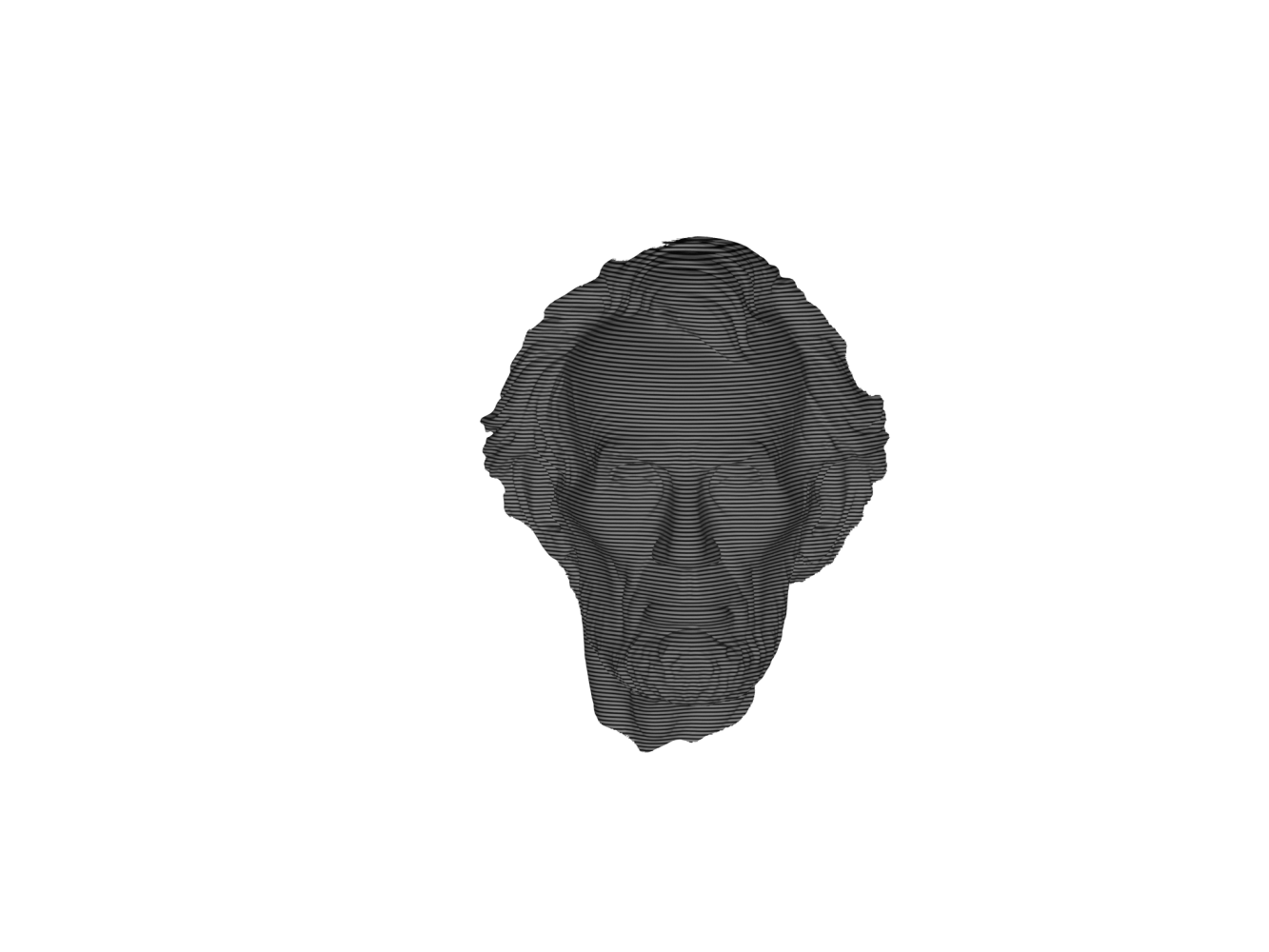
有以上分析得，在数字相移中，需要将有一定相位差的条纹和捕捉到的图形的灰度矩阵，每元素对应相乘，即能得到含有高频噪声的莫尔图样。在TO-DO下图，可观察出有与物体登高线对应的莫尔条纹，出现此现象的具体原因正是由于，处于同一高度的位置的相位与参考平面的相位差一直，故带入强度分布函数中，得出的灰度值也一致。在相位提取中需要四张有不同相位差得到的高频噪声莫尔图样。即得到的莫尔条纹会根据初始相位差不同，而出现强度的重新分布。下图中，比较了相位差为林肯脸发尖和鼻尖的相位对比，明显强度不同。通过这两处的对比，通过相同强度的位置所对应的高度一致，相位一致，可以推断出，初始相位差导致莫尔条纹相位整体发生了移动。这一点验证了我们对于TO-DO低频项对应莫尔条纹的假设。

图11数字相移：a)待测物体原型；b)经过物体高度分布扭曲的投影条纹；c)和同频率条纹，叠加产生的含有高频噪声的莫尔条纹

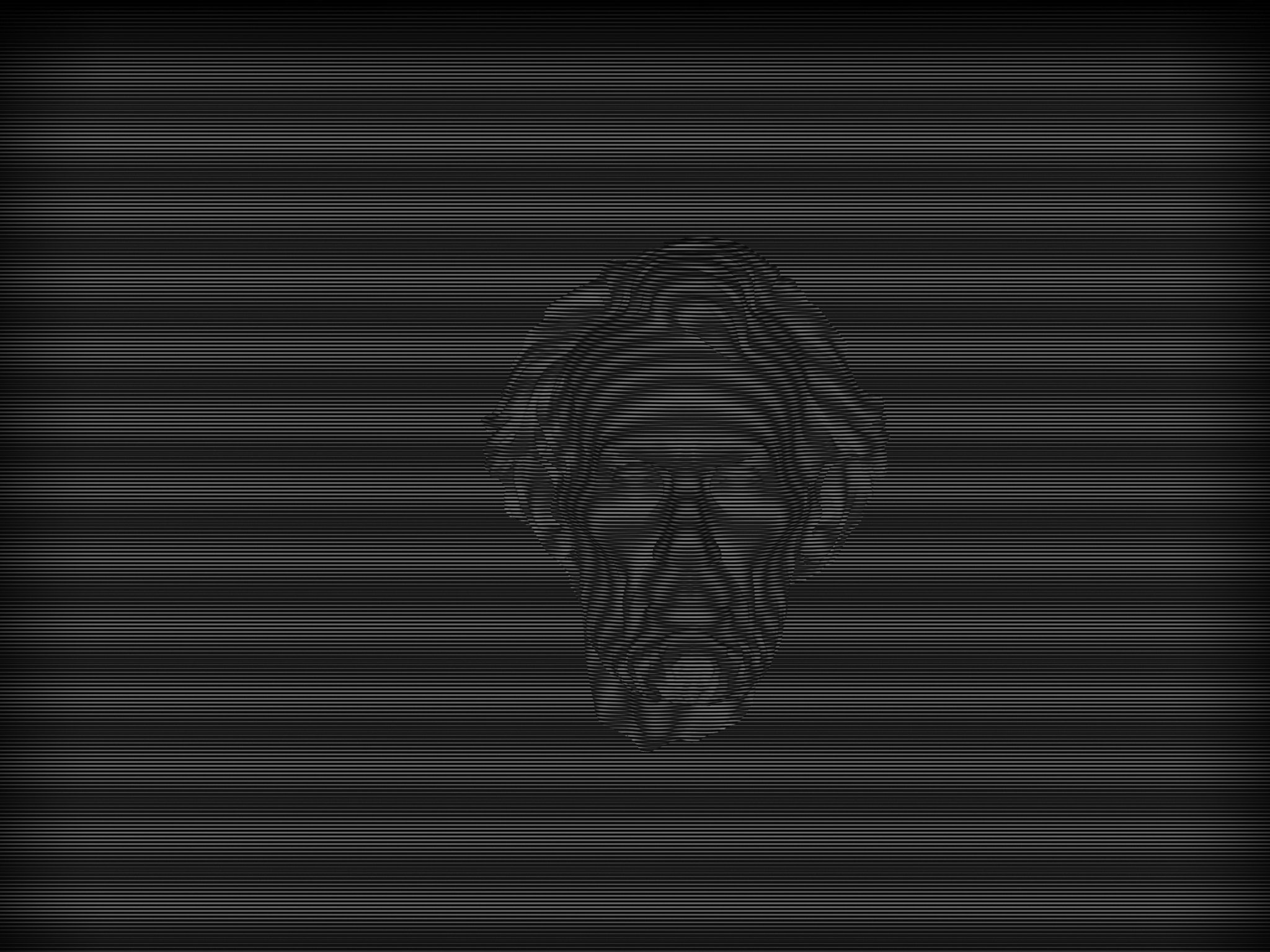
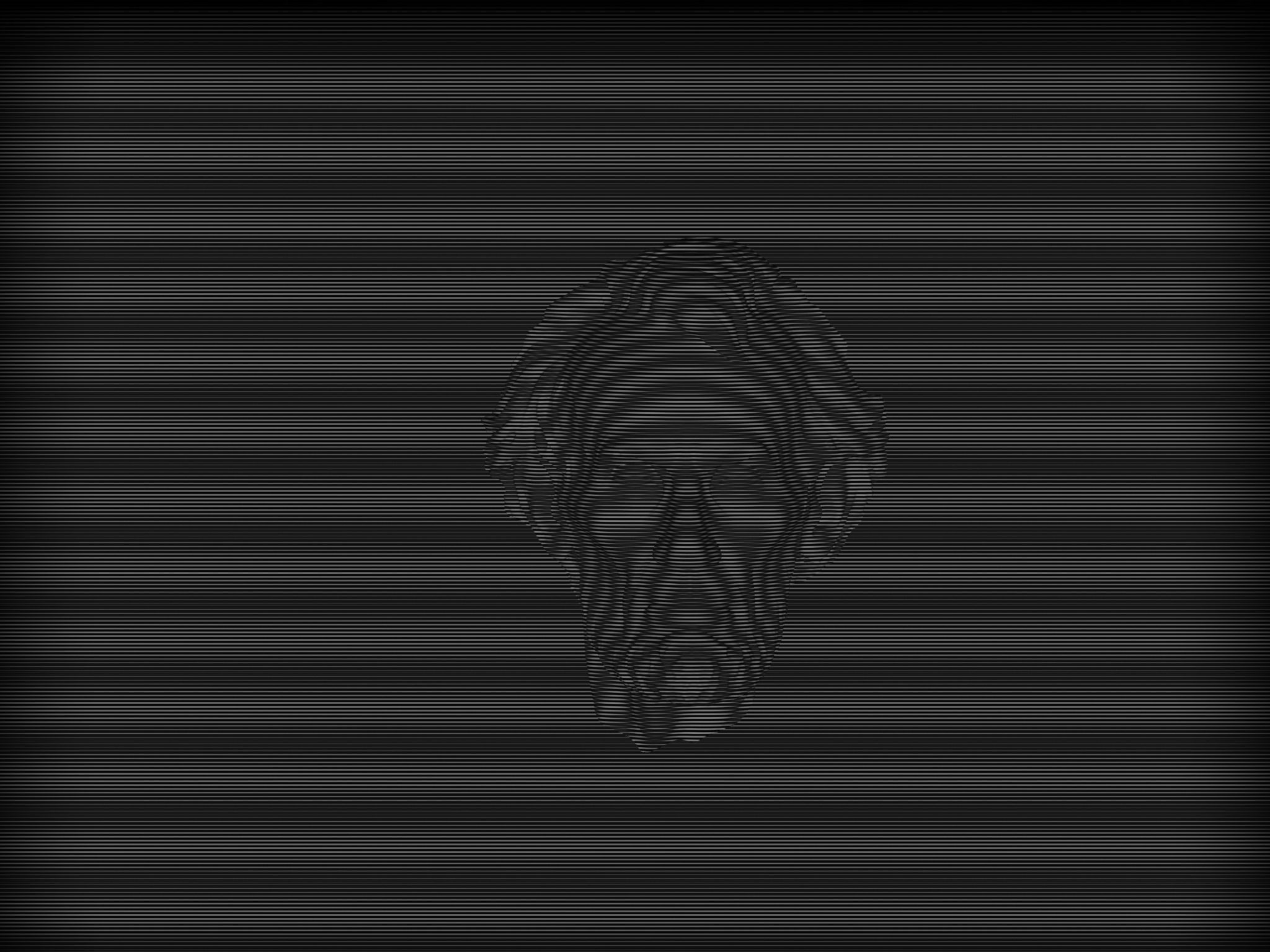
下一章讨论如何过滤上图中的高频成分，得出对应被测面高度信息的低频成分，并用于相位提取部分。在相位提取中，需要4张，初始相位不同的莫尔图样，得到折叠相位分布。但由于这4张莫尔图样，是在原捕捉图像上，叠加不同初始相位的同周期条纹得到，故只需捕捉一张图像。这也是数字莫尔三维测量的一大优势，并为其提供了测量变形中，或运动中物体的潜力[22]。

图 4莫尔条纹和相位和初始相位关系：a)，林肯脸鼻尖；b)，林肯脸鼻尖；c)，林肯脸发梢；c)，林肯脸发梢；

(b)

(c)

(d)

(a)

1. 高频载波滤波
   1. 高频载波滤波原理

根据第四章的讨论，为了得到去噪的莫尔条纹，以便于从其相位得出有关物体高度的相位分布，需要首先去除数字相移中，叠加的同周期，不同初始相位的条纹，其次，需要过滤最开始被物体高度分布扭曲的投影条纹，最后是二值条纹的不连续变化。为了达到这一目的，很多方法被提出。在莫尔三维测量早期，该工作是由测绘员手动勾勒出莫尔等高线，费时复杂，误差大[18]。随着计算机技术的发展，不断有学者利用快速傅立叶变换等算法，过滤噪声[20]。但，仅在经过傅立叶变换后，使用低通滤波器，也会使得图像细节模糊。为了解决这一问题，平稳小波变换和傅立叶低通滤波的方法被提出[8, 23, 24]。

平稳小波变换变换，和离散小波变换不同，没经过一个高通或者低通滤波器，都伴随一个上采样过程，最终得到的变换结果和原始数据个数一致。根据不同的实现算法，上采样的具体过程不一样，但属于非抽取变换，即变化后，结果和原始数据纬度一致[25, 26]。同时，平稳小波变化具有时移不变性，即将信号平移到,经过平稳小波变换的结果相同。这一性质对于噪声消除极为重要[8, 27]。

一位小波变换是在每一分解层将

* 1. 程序解释
  2. 结果分析

1. 相位提取展开
   1. 相位提取
   2. 相位展开
2. 实验过程和结果
   1. 实验过程
   2. 实验结果
3. 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.

20. Halioua, M. and H.-C. Liu, *Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry.* Optics and lasers in engineering, 1989. **11**(3): p. 185-215.

21. Surrel, Y., *Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping.* Applied optics, 1996. **35**(1): p. 51-60.

22. Zhou, C., et al., *Dynamic 3D shape measurement based on the phase-shifting moir\'e algorithm.* arXiv preprint arXiv:1807.01399, 2018.

23. Mohammadi, F. and J. Kofman, *Improved grid-noise removal in single-frame digital moiré 3D shape measurement.* Optics and Lasers in Engineering, 2016. **86**: p. 143-155.

24. Münch, B., et al., *Stripe and ring artifact removal with combined wavelet—Fourier filtering.* Optics express, 2009. **17**(10): p. 8567-8591.

25. Nason, G.P. and B.W. Silverman, *The stationary wavelet transform and some statistical applications*, in *Wavelets and statistics*. 1995, Springer. p. 281-299.

26. Gyaourova, A., C. Kamath, and I.K. Fodor, *Undecimated wavelet transforms for image de-noising*. 2002, Lawrence Livermore National Lab., CA (US).

27. Coifman, R.R. and D.L. Donoho, *Translation-invariant de-noising*, in *Wavelets and statistics*. 1995, Springer. p. 125-150.

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。

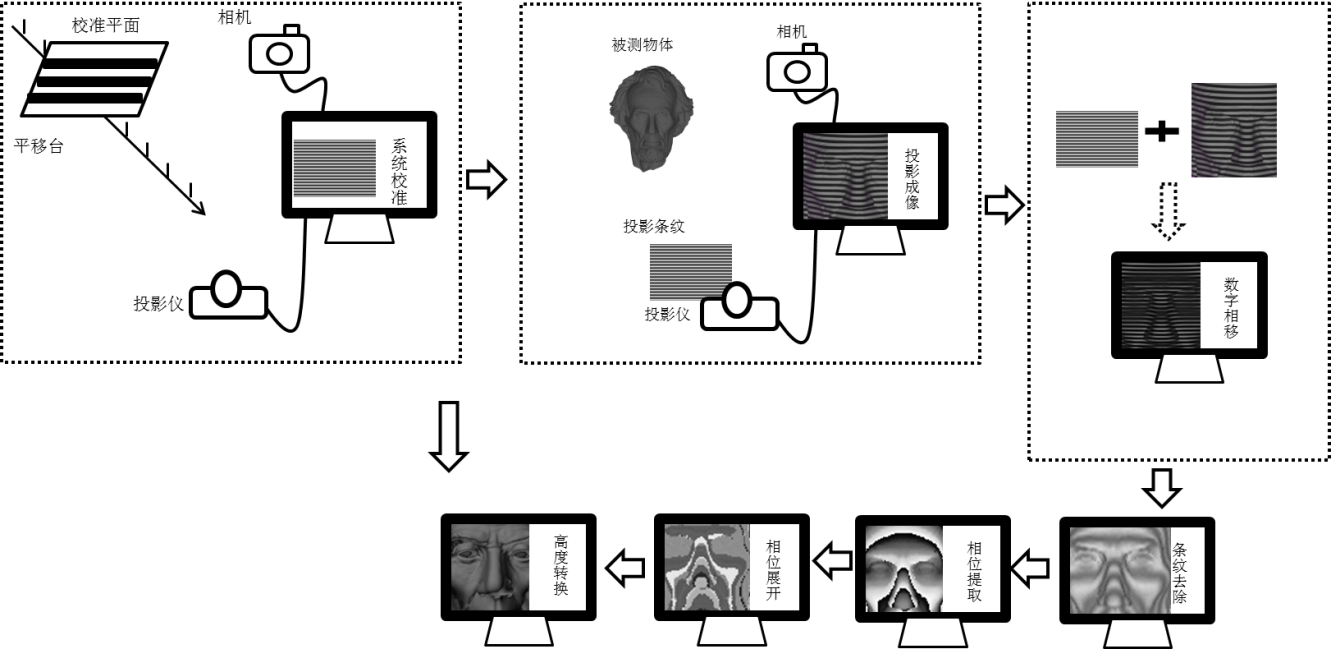
特别鸣谢，光学工程系系主任高位清老师。高老师在论文写作，答辩ppt制作方面，给出了宝贵且实用的建议。

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

近似为，

使用了如下推导过程，

当时，，故可以舍去。整理得出，

1. 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> [↑](#endnote-ref-1)
2. 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> [↑](#endnote-ref-2)
3. 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> [↑](#endnote-ref-3)
4. 相对周期为条纹重复一个周期的像素个数，与投影到参考平面后，得到的具体重复一周期沿X轴经过的距离不同 [↑](#footnote-ref-1)