

学 号： 2014213282

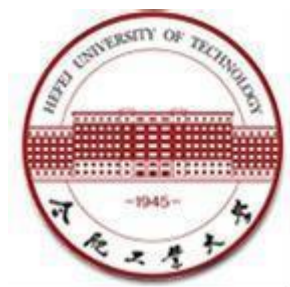
密 级： _____

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,学校有权保留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

Profilometry 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 solution for Profilometry, 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 algorithmical complexity and errors.

KEYWORDS: Profilometry; 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 | 1 |
| 1.1.2 | 结构光三维测量 | 2 |
| 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 | 5 |
| 2.1 | 传统莫尔三维测量的相位-高度对应关系 | 5 |
| 2.2 | 数字莫尔三维测量的相位-高度对应关系 | 7 |
| 2.2.1 | 模拟环境下的相位-高度对应关系 | 8 |
| 2.2.2 | 真实环境下的相位-高度对应关系 | 8 |
| 3 | 实物系统校准 | 9 |
| 4 | 数字相移 | 10 |
| 5 | 高频载波滤波 | 11 |
| 6 | 相位提取展开 | 12 |
| 7 | 实验过程和结果 | 13 |
| 8 | 结论 | 14 |
| | 参考文献 | 15 |
| | 致谢 | 16 |
| | 附录 | 17 |

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。 Ⅲ

未找到图形项目表。 Ⅲ

Ⅲ

（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）

1 绪论

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，电磁学三位面形测量, 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 三坐标测量机和结构光三维测量对比

| | 三坐标测量机 | 结构光 |
|------|-----------------|---------------------|
| 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，有设备尺寸决定 | 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 结构光三维测量

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，结构光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。目前结构光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，结构光三维量程相对较大，设备简单，成本低廉，可测量柔软和移动中物体。

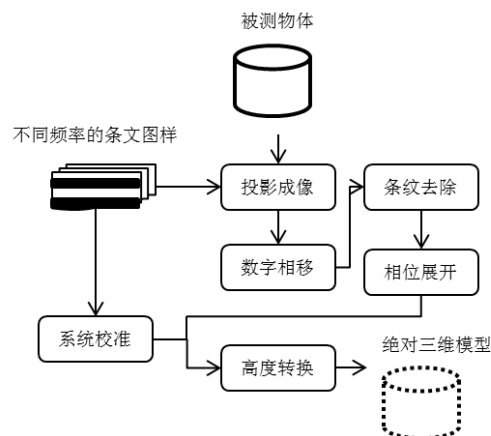


图 1 数字莫尔三维测量流程图

1.2 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。

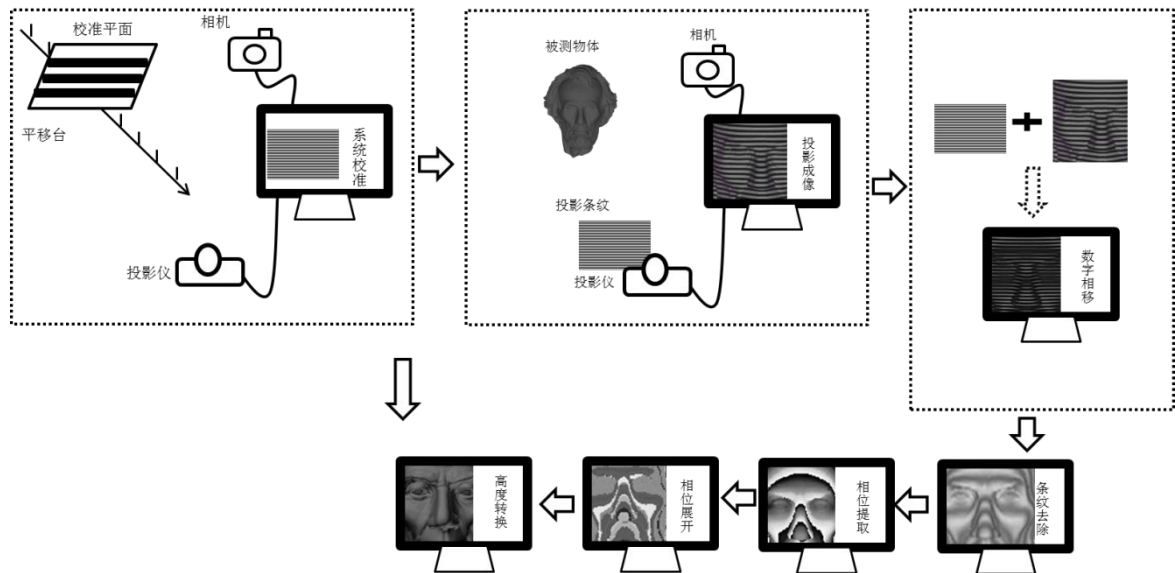


图 2 数字莫尔三维测量实验装置示意图：从左上角按箭头方向依次，系统校准，投影成像，数字相移，条纹消除，相位提取，相位展开，高度转换

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 2π 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 2π 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结构光的三维扫描仪；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ⁱ开发的基于光栅结构光的桌面 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ⁱⁱ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

2.1 传统莫尔三维测量的相位-高度对应关系

2.1.1 莫尔条纹产生原理

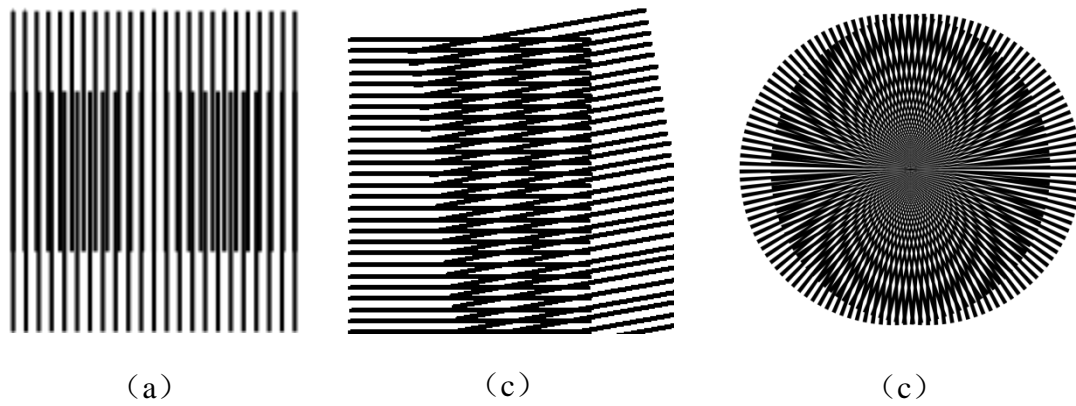


图 4 莫尔条纹产生方式：a) 不同周期；b) 成角度；c) 不完全重合

莫尔条纹ⁱⁱⁱ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[13]。首先讨论等间隔不同周期光栅叠加。

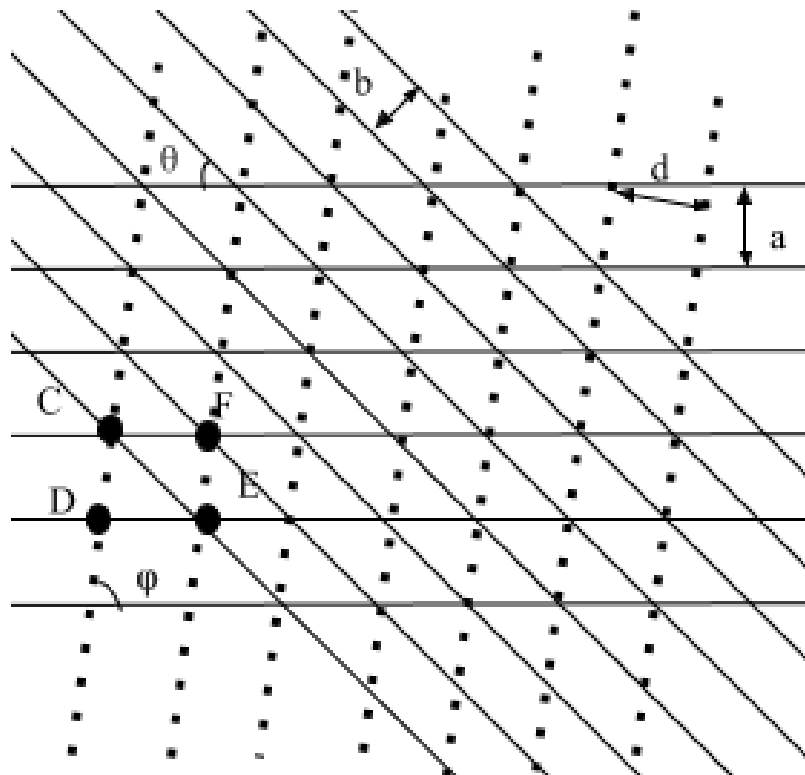


图 5 光栅重叠产生莫尔条纹

如图，等间隔光栅 A，间隔 a 和等间隔光栅 B，间隔 b 以 θ 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，

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

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，

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

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

此时，莫尔条纹和两光栅夹角的平分线垂直。由于数字莫尔三位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[14]。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[15, 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。

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

该式子前三项为条纹本身携带的强度，对应着数字莫尔三位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。

2.1.2 三角测量法

2.2 数字莫尔三维测量的相位-高度对应关系

2.2.1 模拟环境下的相位-高度对应关系

2.2.2 真实环境下的相位-高度对应关系

3 实物系统校准

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. Nishijima, Y. and G. Oster, *Moiré patterns: their application to refractive index and refractive index gradient measurements*. JOSA, 1964. **54**(1): p. 1-5.
14. Amidror, I. and R.D. Hersch, *Mathematical moiré models and their limitations*. Journal of Modern Optics, 2010. **57**(1): p. 23-36.
15. Creath, K. and J. Wyant, *Moiré and fringe projection techniques*. Optical shop testing, 1992. **2**: p. 653-685.
16. 朱丽君, 数字莫尔条纹三维面形测量技术研究. 2016, 山东大学.

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学长严绍华也提供了许多有价值的讨论。

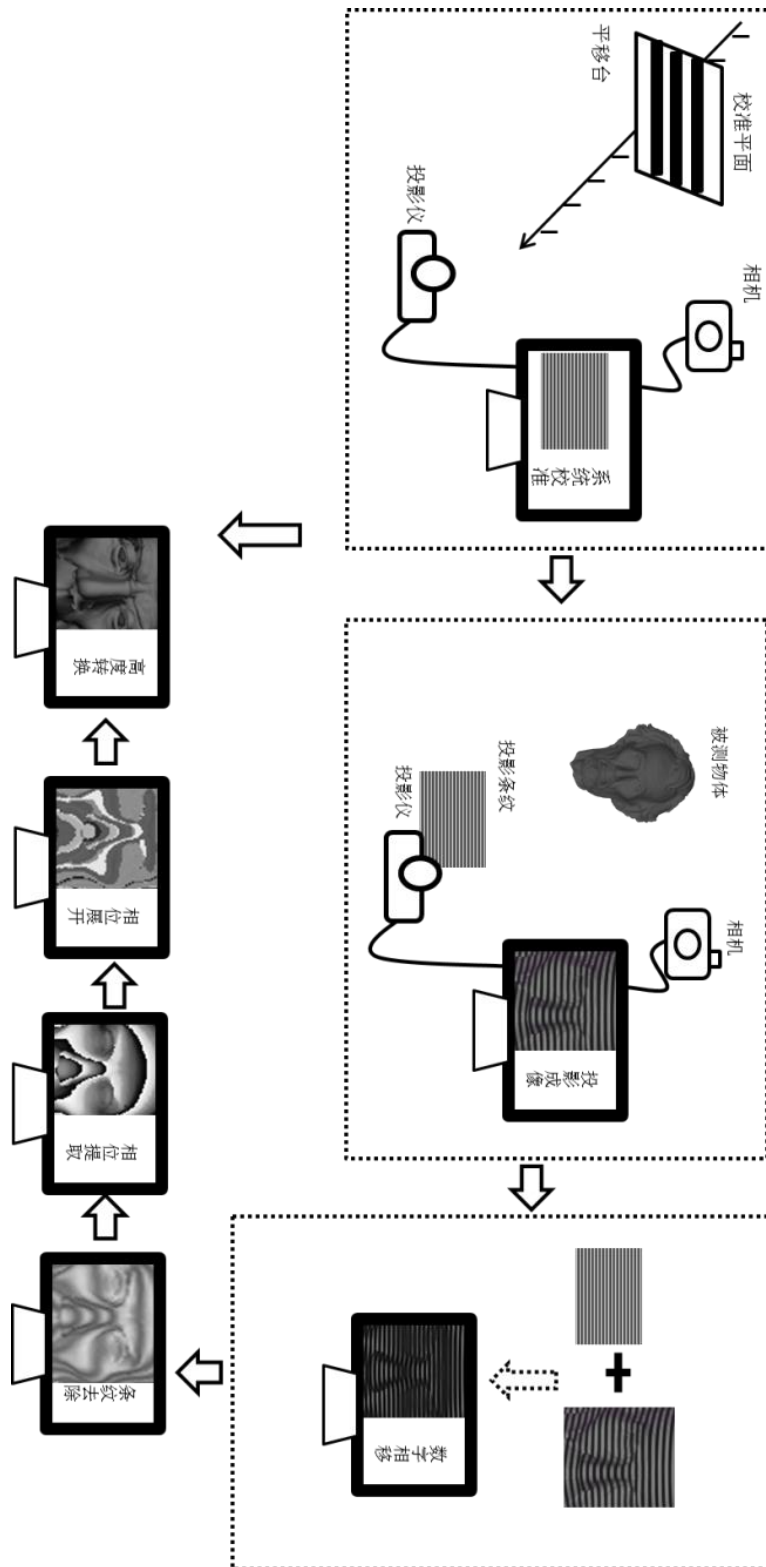
特别鸣谢，光学工程系系主任高位清老师！高老师在论文写作，答辩ppt制作方面，给出了宝贵且实用的建议。

此外，向提供

作者：张凡

2019年 05 月 25 日

附录



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

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