

谢谢袁老师的介绍 !评委老师们好,我是答辩人张凡,来自电物学院,专业是应用物理。

我的毕设是关于数字莫尔三维测量及精度分析。

莫尔三维测量是在物体上产生莫尔条纹。然后通过莫尔条纹得到待测物体高度分布的技术。

数字莫尔三维测量测量传统莫尔三维测量中的莫尔测量的产生,计算高度分布的两个步骤转移到计算上处理。

我的答辩第一部分介绍了莫尔三维测量的发展,这一部分对应我论文的第 1 章绪论。

第二部分讨论了将莫尔条纹和物体等高线的关系,这一部分对应我论文的第 2, 3 章。

第三部分演示了数字莫尔条纹的产生,和如何处理产生的数字莫尔条纹最后得到物体的高度分布,这一部分对应着我论文的第 4, 5 章。

最后一份部分总结我的毕业论文,给出了我研究的结果和缺陷,这一部分对应我论文的第 6 章。

首先来看看传统的莫尔测量方法。

最早期的莫尔测量在物体上直接产生莫尔条纹,然后由人工定标得出登高线和级次。在数字莫尔三维测量

中，这样的步骤都交由计算机处理。

按照产生莫尔条纹方式分为投影莫尔三维测量和阴影莫尔三维测量。

我们首先来看阴影投影

阴影莫尔三维测量是利用光栅和光栅的影子重叠形成莫尔条纹。

投影莫尔是利用投影光栅和同光栅参数的观察光栅重叠产生莫尔条纹。

今年年初也有南京理工大学学者学者深度学习来处理得到的条纹投影图片。

但由于实验环境的限制，没有计算的 GPU，本论文未向这一方向深入研究。

莫尔条纹为什么可以得到物体的高度信息，首先要讨论相位高度关系。

数字摩尔三维测量沿用了传统莫尔测量的测量原理。

传统莫尔测量有一个核心的关系，是相位高度关系。

根据这一关系并引入了莫尔波长这一概提出了一个实物系统校准的过程。

我们首先来看相位和高度之间的关系。

### 【使用激光笔】

三角形 ABO 和 CBO 相似

三角形 ODN 和 MEO 相似

对任何待测点成立

高度分布和条纹相位分布的相位分布关系

在得到了相位高度关系后，我们可以通过这一关系，近似得到相位-高度的近似关系。

这一线性关系，能帮助要校准测量系统，提高精度。

### 【使用激光笔】

当  $H \gg h$  时，可将分母中的常数项忽略。整理可得  
就是说，一个莫尔波长的高度变化，对应相位变化  $2\pi$ 。

线性校准过程

### 【使用激光笔】

在被测高度变化处于周期尺度范围内，投影条纹可看作恒定大小， $K$  可看作常数。当高度变化范围更大时，投影仪对投射出的条纹图样具有放大或缩小作用，会使条纹周期  $L$  发生变化。随着高度增加，条纹图样缩小，条纹周期  $L$  减小，莫尔波长减小。反之，条纹周期  $L$  变大，莫尔波长变大。

如图，线性系统校准过程需要针对不同高度位置，不同条纹周期的两个变量进行。

在将得到的相位变化相差  $2\pi$  的两位置最为后一高度的莫尔波长。

最后将得到的莫尔波长对于像素平均。

如图，不同频率的条纹投影到被测物体上，捕捉图像后就是后期计算机处理的问题。

叠加不同初始相位的条纹。

去除高频后条纹，相位提取和展开得到相位分布，最后高度转换得到绝对三维模型。

首先，我们来看数字莫尔条纹的生成

### 【使用激光笔】

数字莫尔条纹生成需要同周期的条纹和捕捉到的图像这二者的灰度矩阵元素对应相乘，从而得出含有高频噪声的莫尔图样。在图 11(c)中，可观察到有与物体等高线对应的莫尔条纹。未出现莫尔现象处的相位与参考平面的相位差相同。

条纹叠加的过程是在 3ds Max 三维仿真软件里进行

### 【使用激光笔】

与实物测量系统不同的是，本论文使用了 3ds Max 三维仿真软件和 MATLAB 科学计算环境产生莫尔条纹。如图 12，在场景导入或创建被测物体。然后，离物体 2.5m 处，设置摄像机和方向灯。然后，调节摄像机的视场角和焦距，使视场完全覆盖所测物体。调节方向灯的光阑参数，使投影范围大致和摄像机成像范围重合。在方向灯的高级选项中的映射选项，选择相位图，选择投影条纹投射。最后渲染得到捕捉图像。本论文仿真环境下的几何参数 相机-投影仪光轴夹角为  $7^{\circ}$ ，相机-投影仪距离为 32 厘米，投影仪-相机平面距参考平面距离为 2.5 米。渲染得到图像导入到 MATLAB，灰度化处理后，作为矩阵保存

下一步是高频条纹的滤除

### 【使用激光笔】

在相位提取中，需要 4 张初始相位不同的莫尔图样，来计算折叠相位分布。由于这 4 张莫尔图样，是在原捕捉图像上，通过叠加不同初始相位的同周期条纹得到。所以，数字莫尔三维测量只需捕捉一张图像，就能得到一张折叠相位图像。这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。

单上面四张图都有高频条纹，如何滤除

### 【使用激光笔】

MATLAB 二维平稳小波变换

平稳小波变换，和离散小波变换不同，每经过高通滤波器或低通滤波器，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。虽然实现平稳小

波变化的方法较多,但均属于非抽取变换。在变化后,结果和原始数据维度相同<sup>[25,26]</sup>。同时,平稳小波变化具有时移不变性,即将信号  $t(x)$  平移到  $t(x - x_0)$  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。

在每一分解层,一维小波变换通过高通滤波器和低通滤波器,不断将信号二分成子带。二维小波变换则是分别在每一行和每一列,进行一维小波变换。

### 【使用激光笔】

如图所示,(a)是由平稳小波变换中第三分解层的水平系数,可见经过三次滤波后,叠加和物体高度分布扭曲的高频条纹集中水平系数中。

图(c)是该水平系数经傅立叶变化后,频谱的幅度分布。在图(c)中,只在竖向频率出现较高幅度分布,符合低通滤波算法部署时的假设——无需对水平空间频率滤波。

在图 (c)对应频率分布每一列乘以标准差为 10,平均值为 0 的高斯函数取样序列便得到了图 16(d)的频率分布。

图(d)是经低通滤波后的频谱幅度图。

在图(b)中,可观察到莫尔等高线。

### 【使用激光笔】

如图所示，(a)是由平稳小波变换中第三分解层的水平系数，可见经过三次滤波后，叠加和物体高度分布扭曲的高频条纹集中水平系数中。

图(c)是该水平系数经傅立叶变化后，频谱的幅度分布。在图(c)中，只在竖向频率出现较高幅度分布，符合低通滤波算法部署时的假设——无需对水平空间频率滤波。

在图 (c)对应频率分布每一列乘以标准差为 10，平均值为 0 的高斯函数取样序列便得到了图 16(d)的频率分布。

图(d)是经低通滤波后的频谱幅度图。

在图(b)中，可观察到莫尔等高线。

### 【使用激光笔】

最后，将经过低通滤波后的水平系数和其他系数，回带到 MATLAB 平稳小波逆变化中，得到最终强度分布结果。

图中由明显莫尔条纹分布

然后如何通过得到的莫尔条纹计算出相位分布。



然后如何通过得到的莫尔条纹计算出相位分布。

### 【使用激光笔】

可以看到，我们使用不同初始相位的条纹叠加，可以得到不同初始相位的莫尔条纹。

从这四张莫尔条纹计算相位分布的过程称为相位提取

### 【使用激光笔】

可以用不同初始相位表达莫尔条纹

根据和差化积公式，可以得到

相位分布

但这个相位分布有问题

该公式是莫尔三维测量外差法求相位分布的方法。其中 $\delta$ 为平移一个像素，所对应的相位。将经过滤波的强度分布矩阵带入上式，可得相位分布。该相位分布和被测物体高度并不是直接对应，并出现多个断带(不连续处)而被测物体高度无此突变。在利用(6.7)式，得出相位分布时，由于 $\arctan$ 函数所求出相位范围处于

$$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

通过判断(6.7)式中分子分母符号，可将上述范围延拓到 $[-\pi, \pi]$ 。

但此范围仍不能和物体高度分布一一对应。这一相位分布称为折叠相位，需经过相位展开，和高度转换得出最终被测物体的三维模型。

在上式子中， $\phi_1$ ， $\phi_2$ 分别对应这莫尔波长 $\lambda_1$ ， $\lambda_2$ ，而且 $\lambda_1 < \lambda_2$ 。相对与同一高度分布，小莫尔波长的相位分布应超前于大莫尔波长的相位分布。但在折叠相位分布里，相位限制在一个周期内。因此，当小莫尔波长的相位分布相对与大莫尔波长的相位分布出现延迟时，既是相位出现折叠时。此时，参考相位加一个周期。

图 23 中使用了 6 像素，8 像素，10 像素为周期的条纹投影到被测物体，林肯脸雕塑上。图 23(a)(b)(c)是有投影条纹后捕捉的三张图像得到的折叠相位。对比这三张图，可以看出，当条纹周期较小，得出的莫尔条纹圈数较多。这意味着利用周期短条纹投影，可以得到更高的灵敏度。但同时需注意，莫尔波长的相对波

长能覆盖被测物体高度范围。

### 【使用激光笔】

林肯脸的三维重建模型，可以观察到相机光轴平行的部分，无法得到准确的高度模型，这也是在固定方向上使用数字莫尔三维测量的一个缺陷。

我的毕业论文讨论了相位-高度的映射关系

完成数字莫尔测量中，产生莫尔条纹，计算高度分布的各个步骤

我的工作由如下的缺陷

首先是没有使用 MATLAB 自带的 GPU 矩阵对象加速运算，由于第一版程序固定的时候，电脑上没有可以使用 CUDA 的显卡，就没使用该对象。

但是，一旦使用该对象，则运算过程中需要保持一致，否则对象转换浪费时间。

其次，本文实现的滤波方法需要针对具体测量模型调参，这也是本文的缺陷这一，未能针对高频噪声的滤除提出使用范围更广但参数更少的算法。

