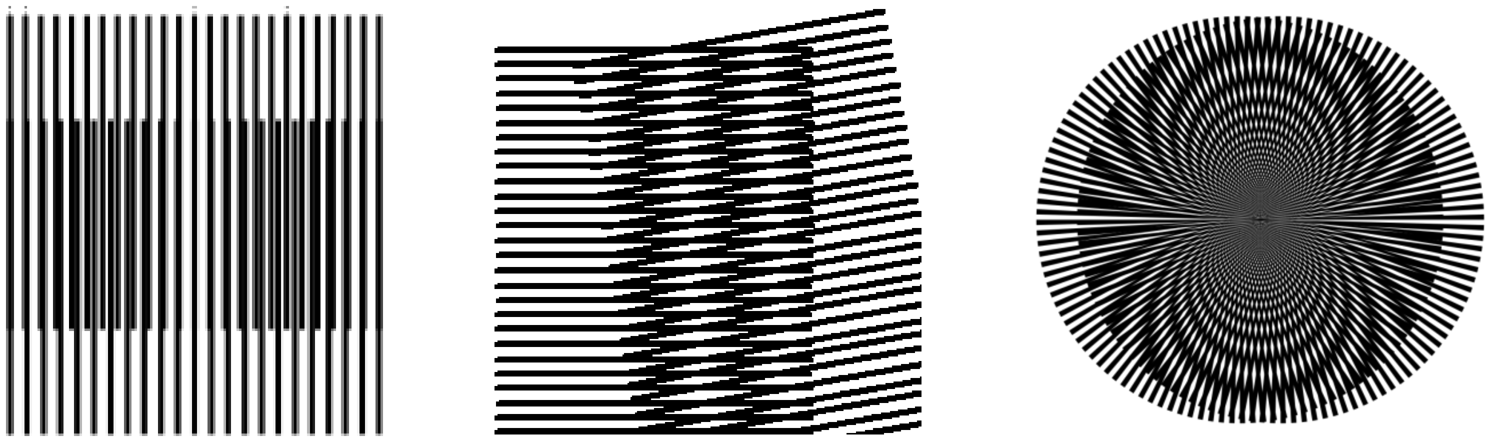
数字莫尔三维测量及精度分析

答辩人 张凡
指导老师 袁自钧

2019 年 5 月30日

① 莫尔条纹产生的原理
② 三角测量法
③ 莫尔波长
④ 数字莫尔条纹的产生
⑤ 高度分布的计算
⑥ 总结

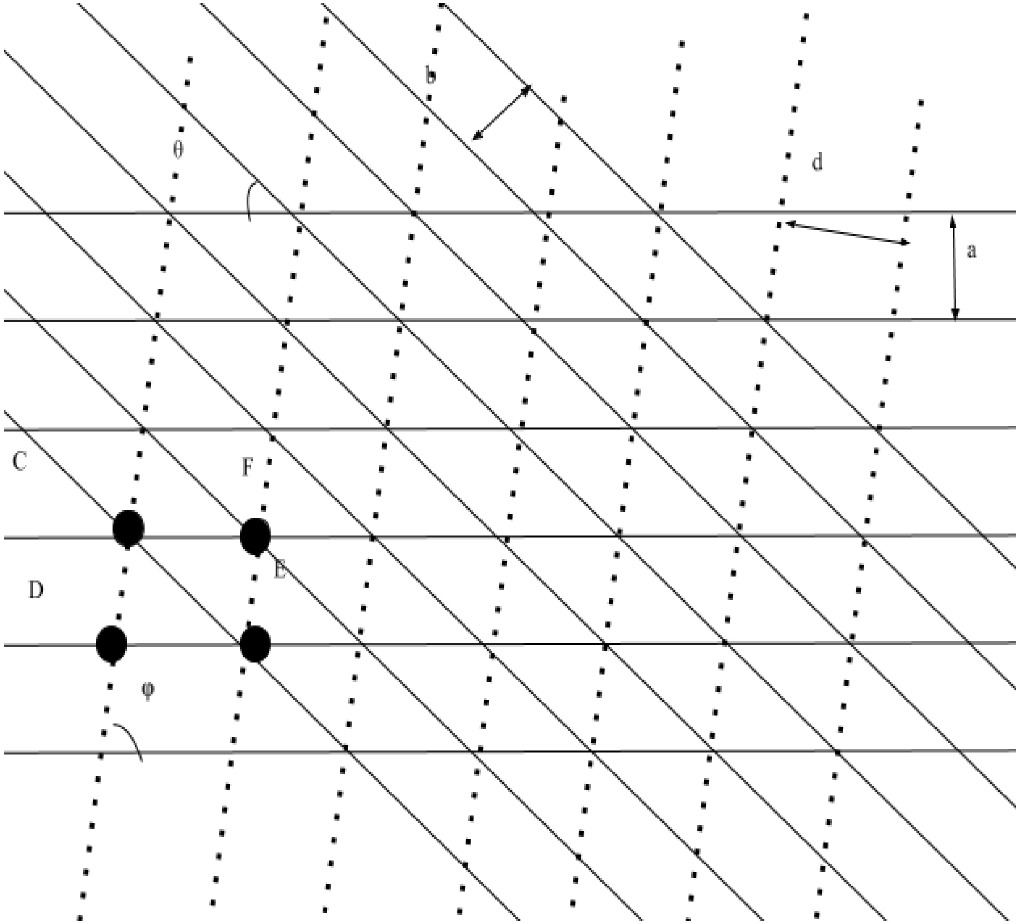
莫尔条纹产生的原理



(a) (b) (c)

莫尔条纹产生方式：(a)不同周期；(b)成角度；(c)不同周期和角度

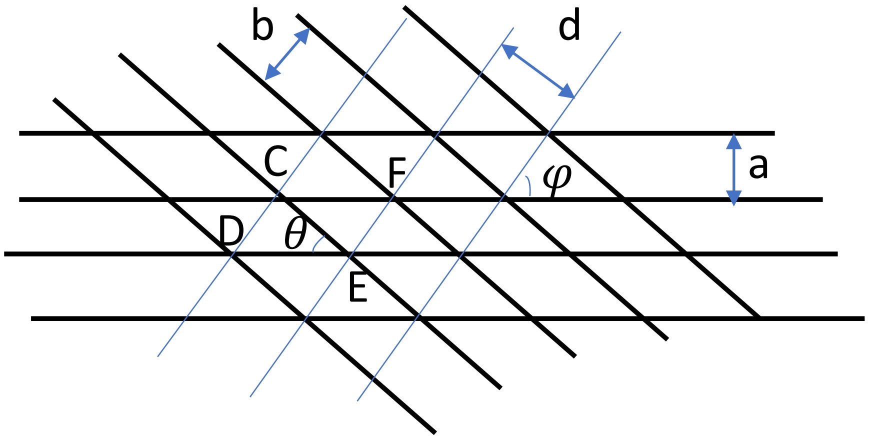
莫尔条纹产生的原理



a，b间隔两光栅以夹角θ重叠产生莫尔条纹

莫尔条纹产生的原理

$$S_{CDEF} = DE \times a = CD \times d = CE \times b$$
$$CD^2 = CE^2 + DE^2 - 2CE \times DE\cos\theta$$



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

$$d^{-2} = b^{-2} + a^{-2} - 2a^{-1}b^{-1}\cos\theta$$

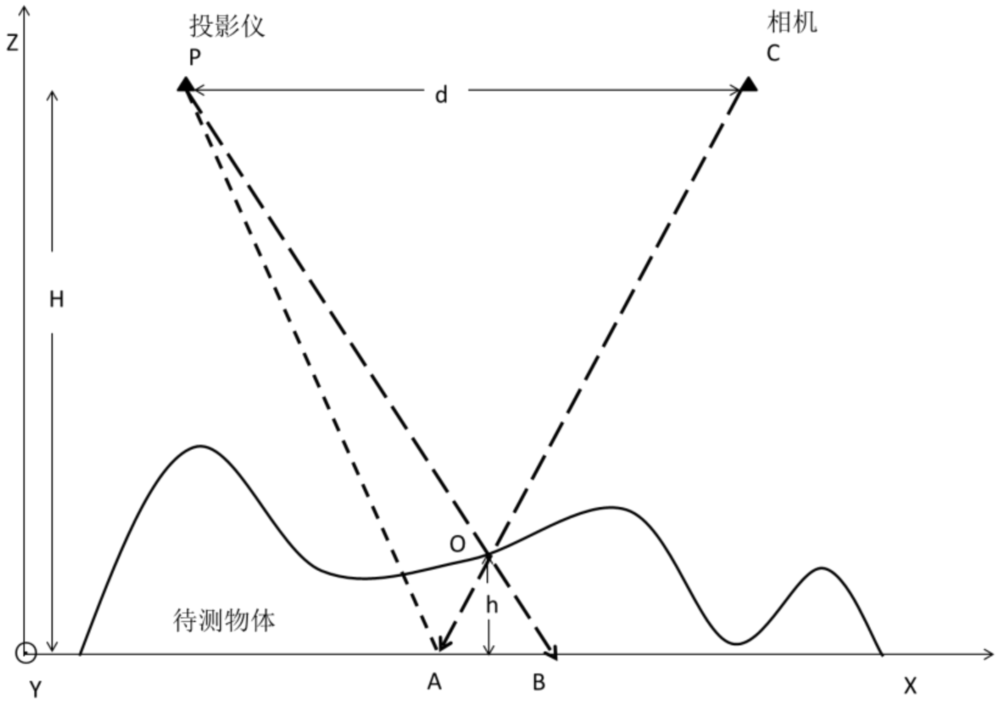
$$d = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta}}$$

$$\text{Sin}\varphi = \frac{d}{DE}$$
$$DE = \frac{b}{\sin\theta}$$

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

物体高度改变条纹周期和夹角

三角测量法



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

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

三角测量法，其中O，A两点相位相同，故AB相差等于OB相差

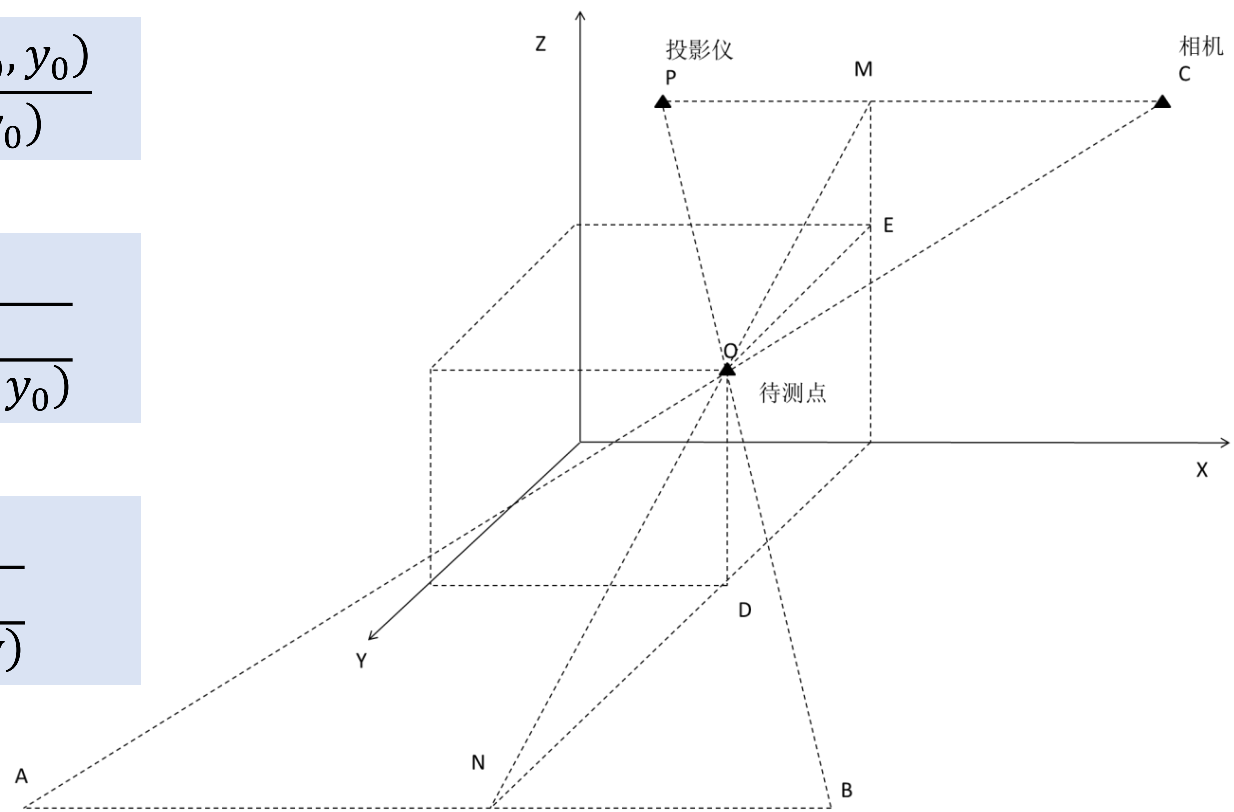
三角测量法

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

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

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

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



被测点在X-Z平面之外的三角测量法

莫尔波长

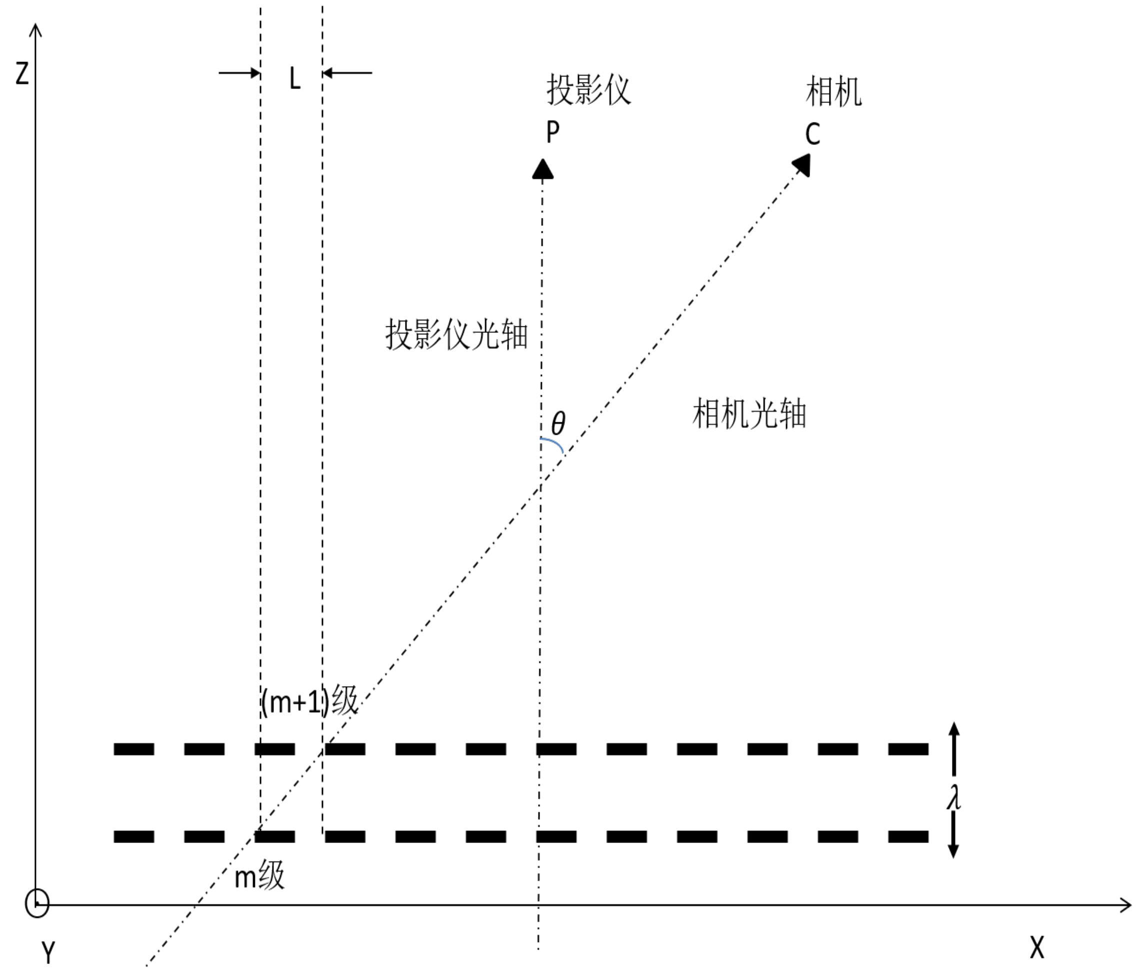
$$h(x,y)=\frac{H}{1+\frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x,y)}}$$

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

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

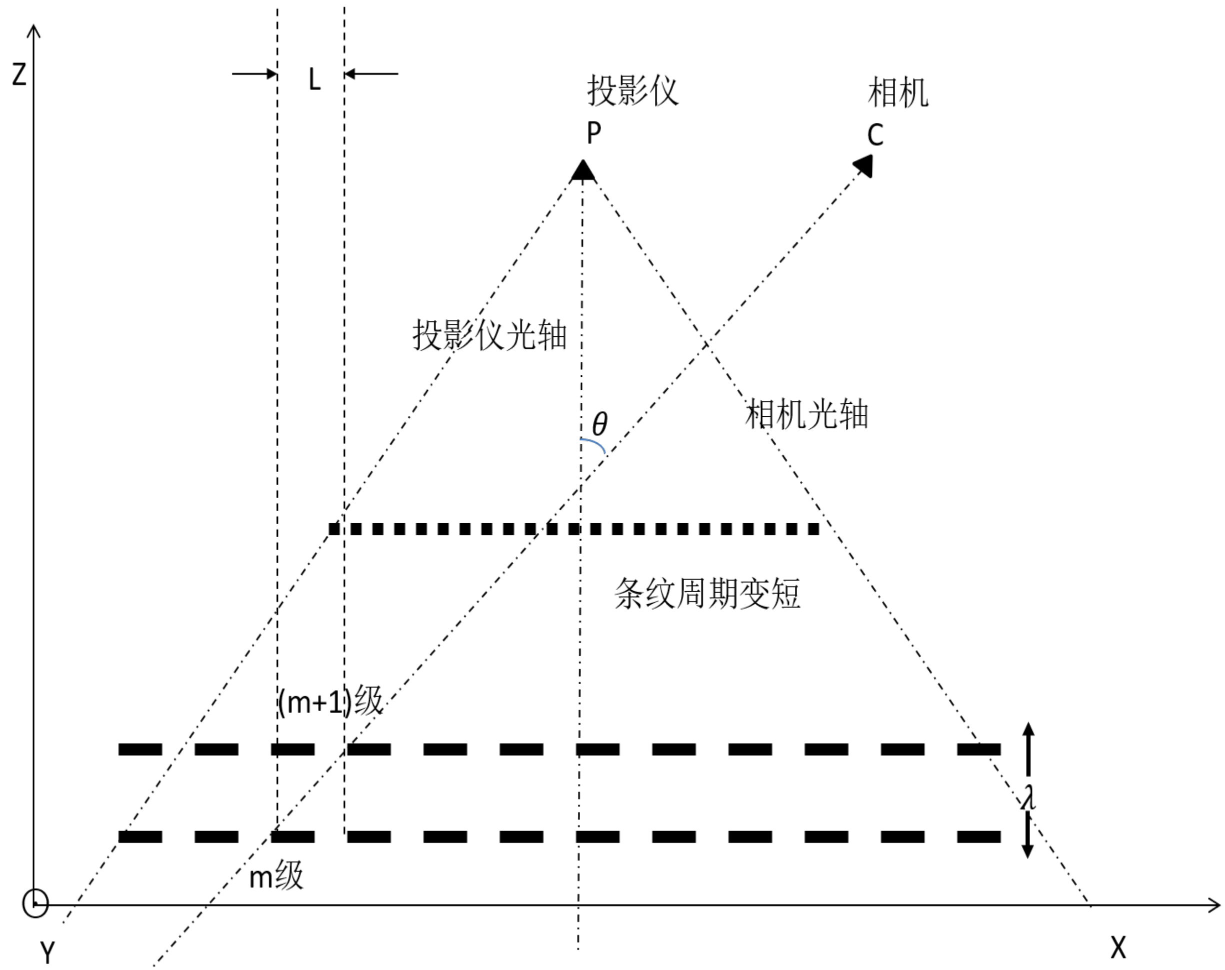
$$K=\frac{\lambda}{2\pi}$$

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



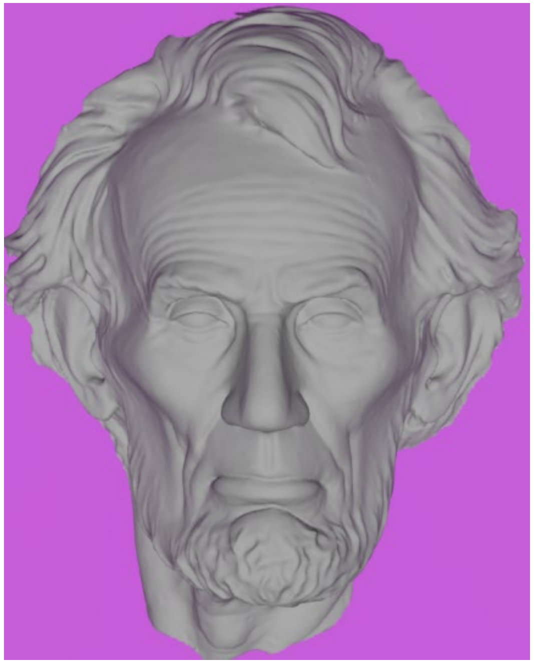
当高度变化较小时，莫尔波长可由投影仪-相机光轴夹角和投影条纹周期确定

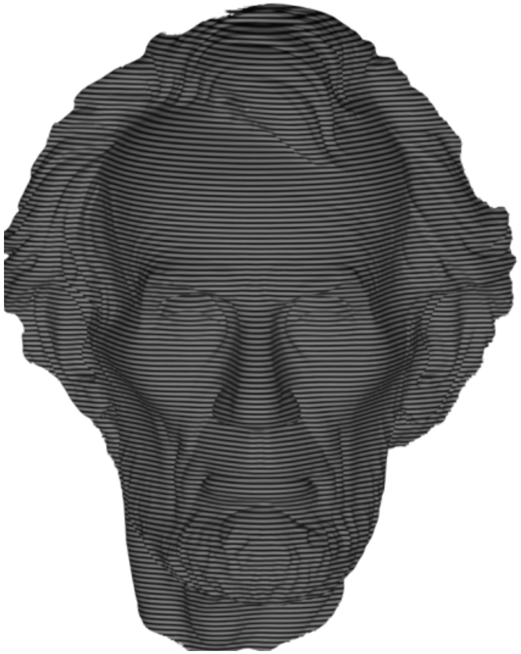
莫尔波长

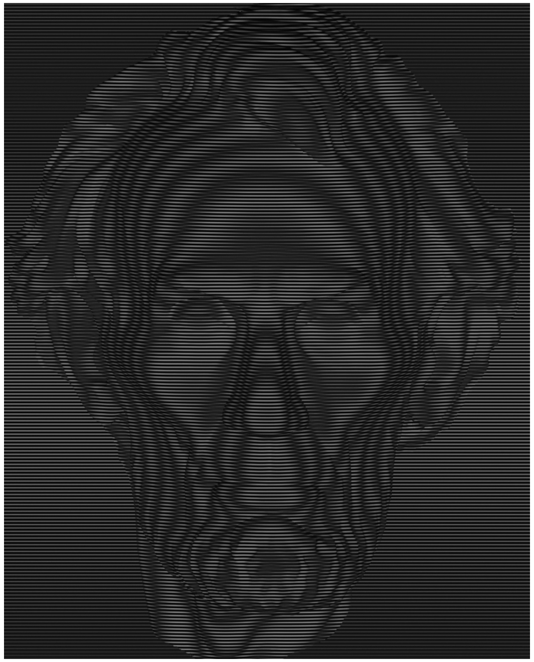


高度变化范围过大，条纹周期L减小，莫尔波长不能视为恒定值

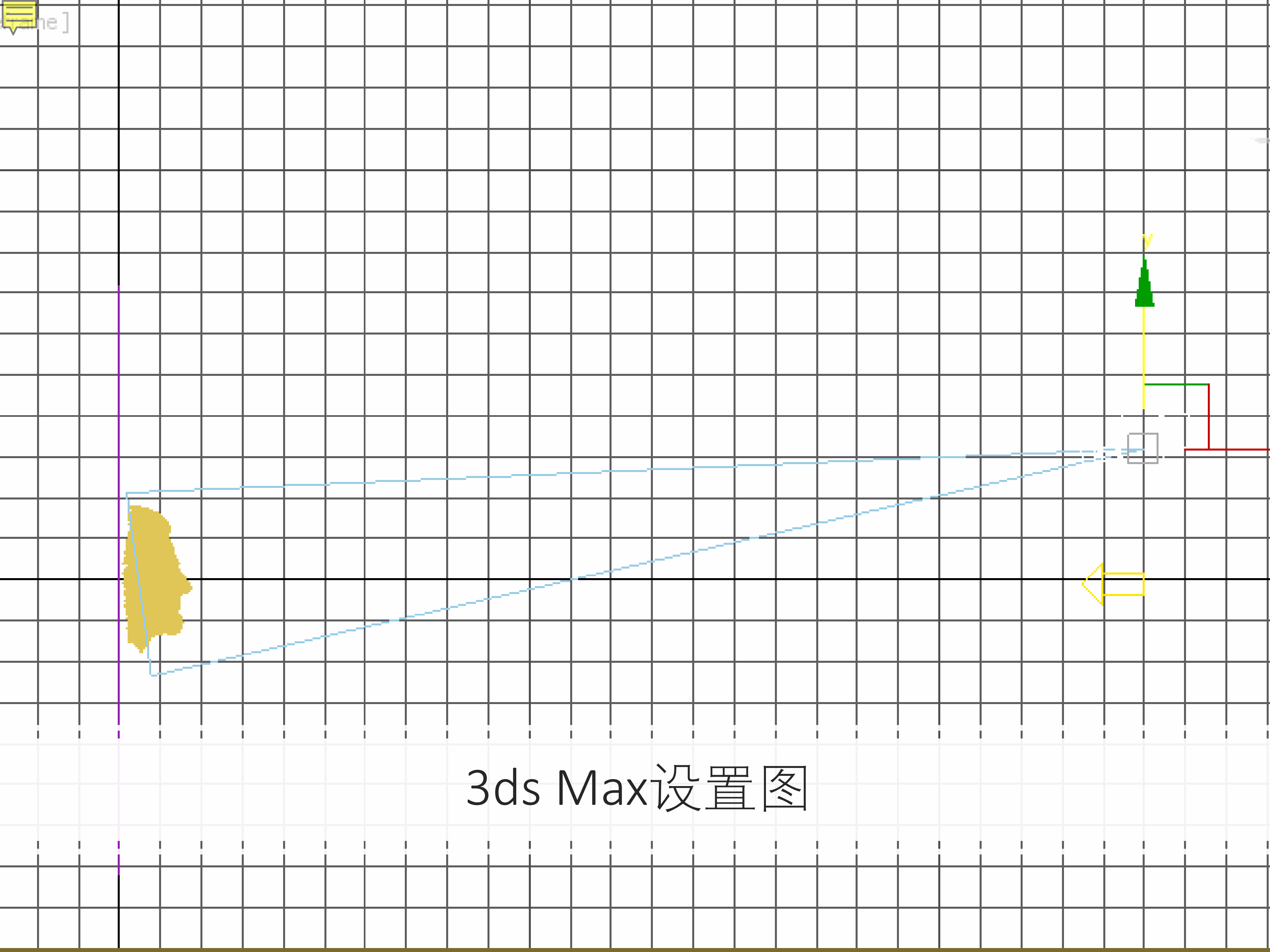
数字莫尔条纹的产生


(a)


(b)

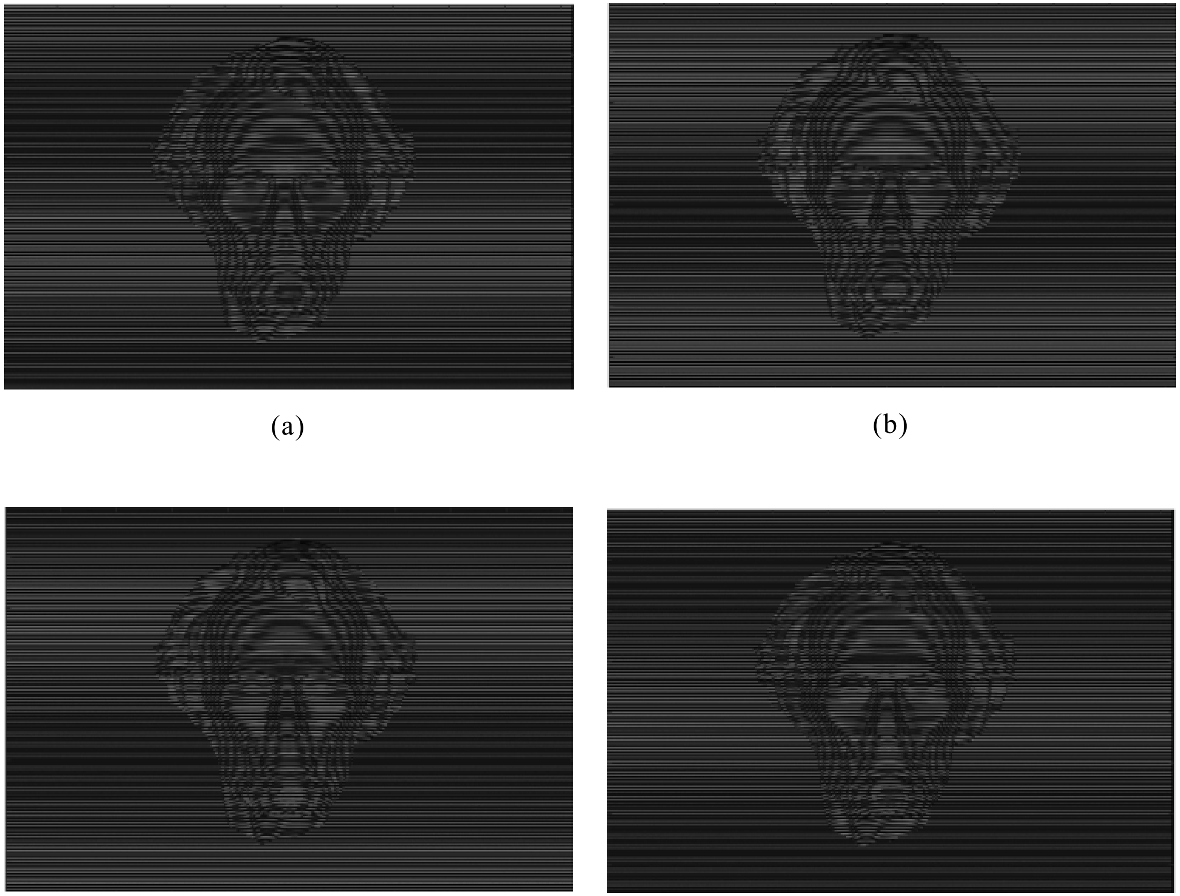

(c)

数字莫尔条纹的产生：(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图样



3ds Max设置图

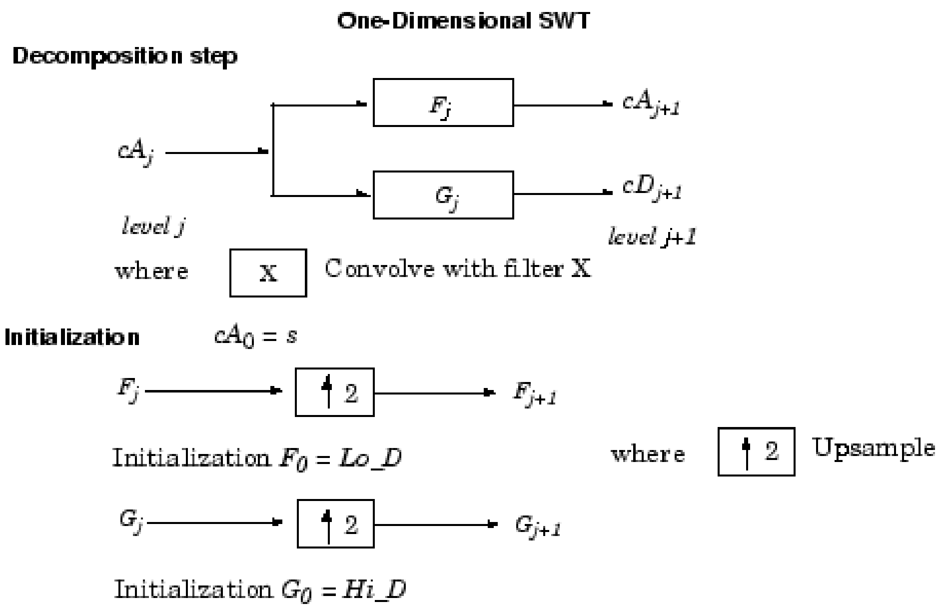
数字莫尔条纹的产生

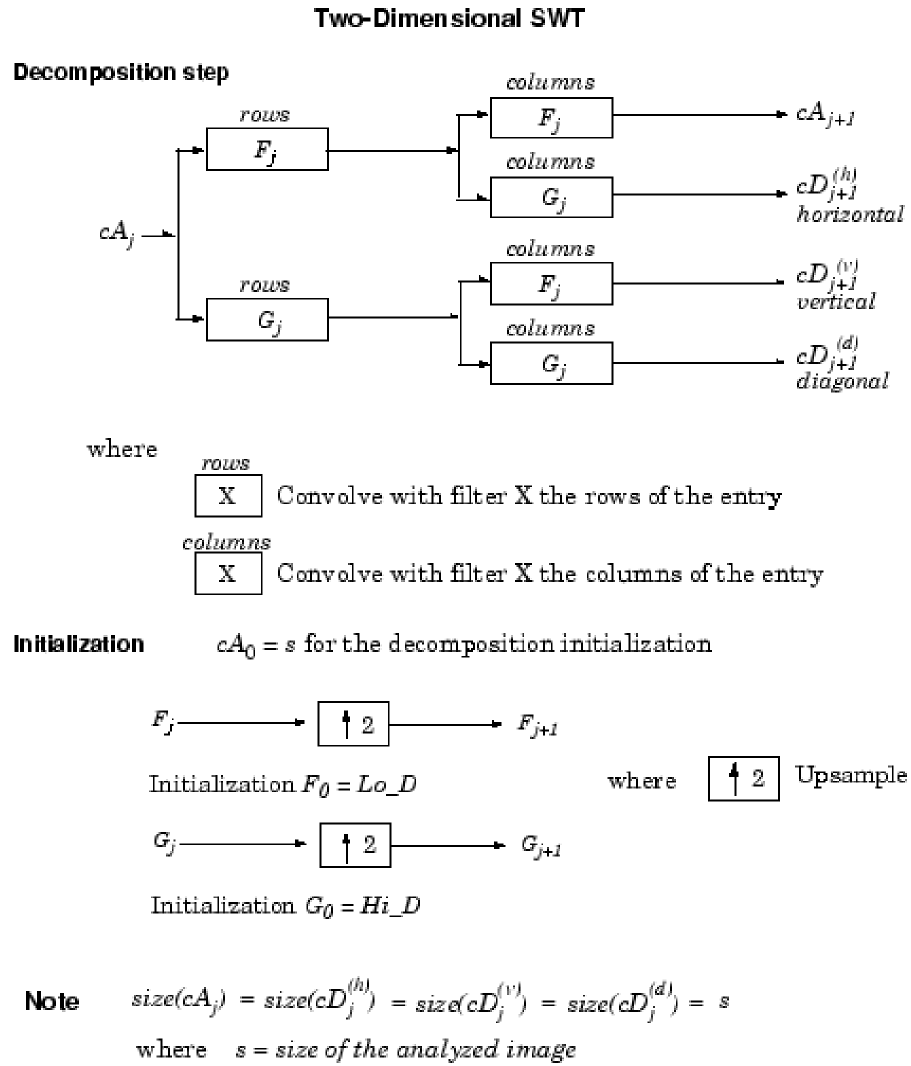


(a) (b) (c) (d)

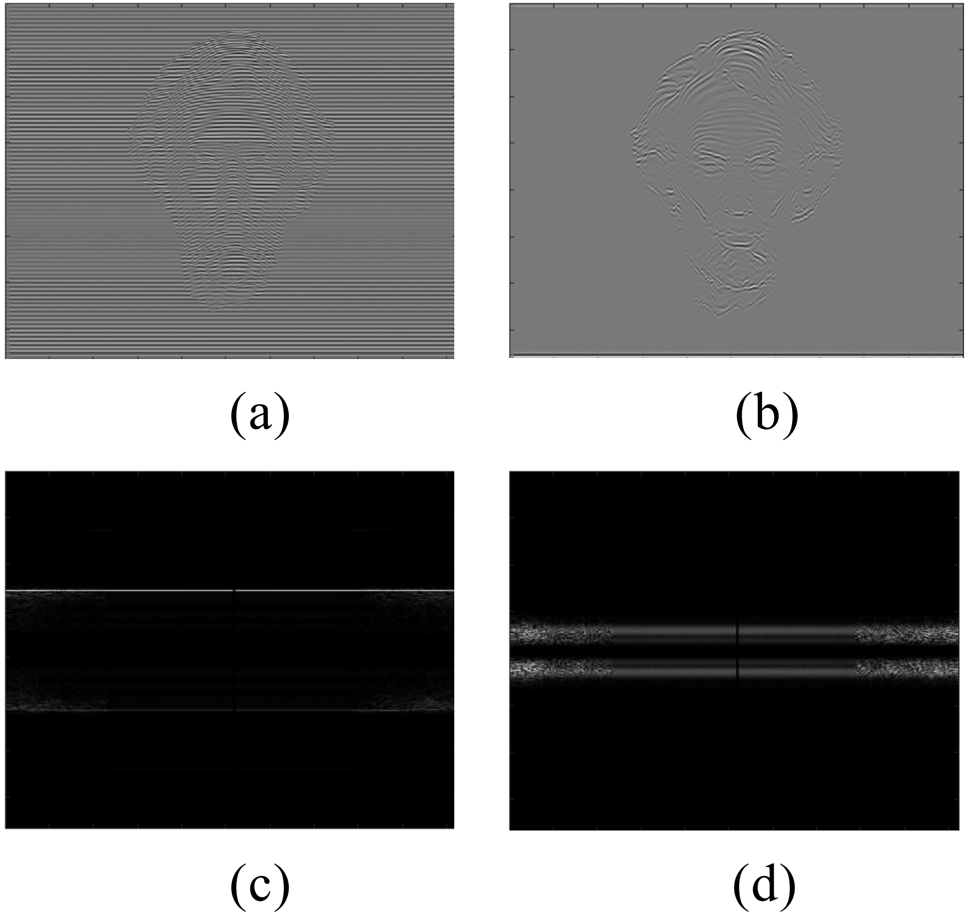
叠加条纹初始相位为0，π，δ，δ + π的，含有高频条纹的莫尔图样

一维和二维平稳小波变化



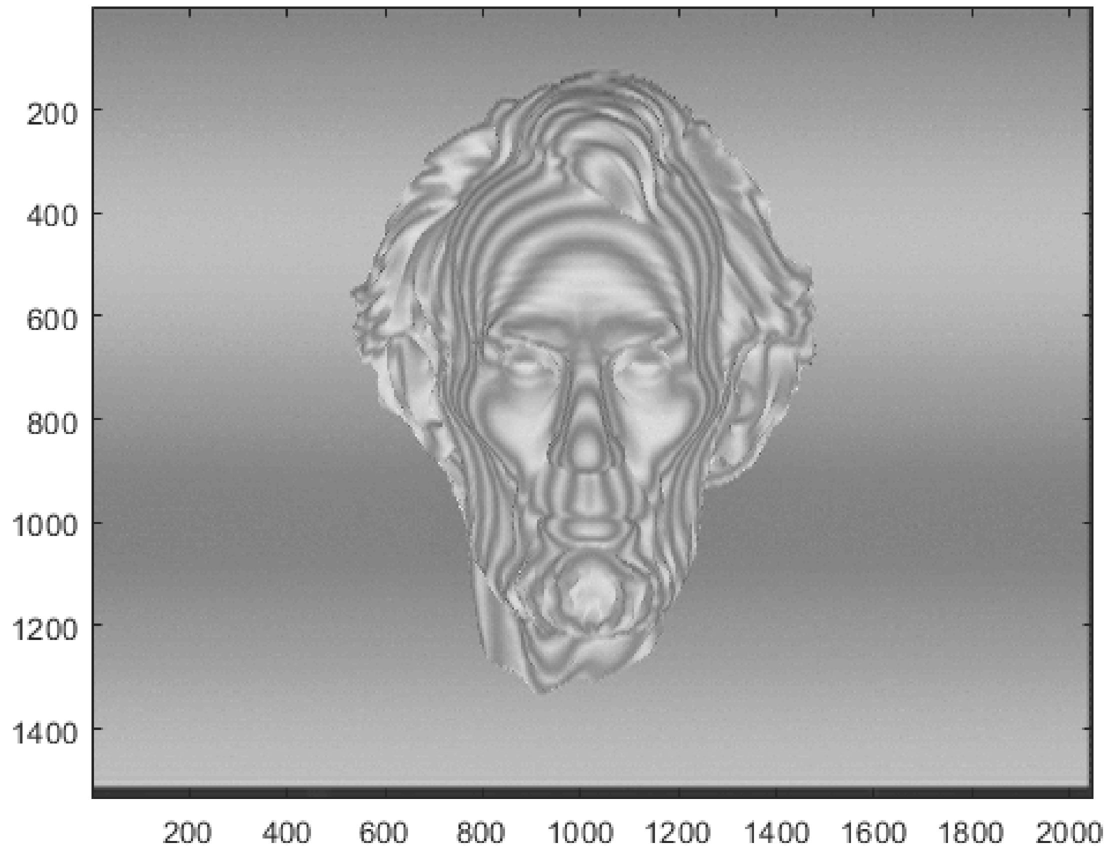


数字莫尔条纹的产生



平稳小波傅立叶滤波林肯脸条纹叠加图：(a)第三层水平分解系数；(b)滤波后第三层分解层水平系数；(c)图(a)中系数傅立叶变化后的频谱幅度；(d)图(c)中频谱经过低通滤波后的频谱幅度

数字莫尔条纹的产生



经过平稳小波变换-傅里叶滤波后的莫尔图样，已无高频条纹

高度分布的计算

(a)

(b)

(c)

(d)

叠加条纹初始相位为0，π，δ，δ＋π的，
已滤除高频条纹的莫尔图样

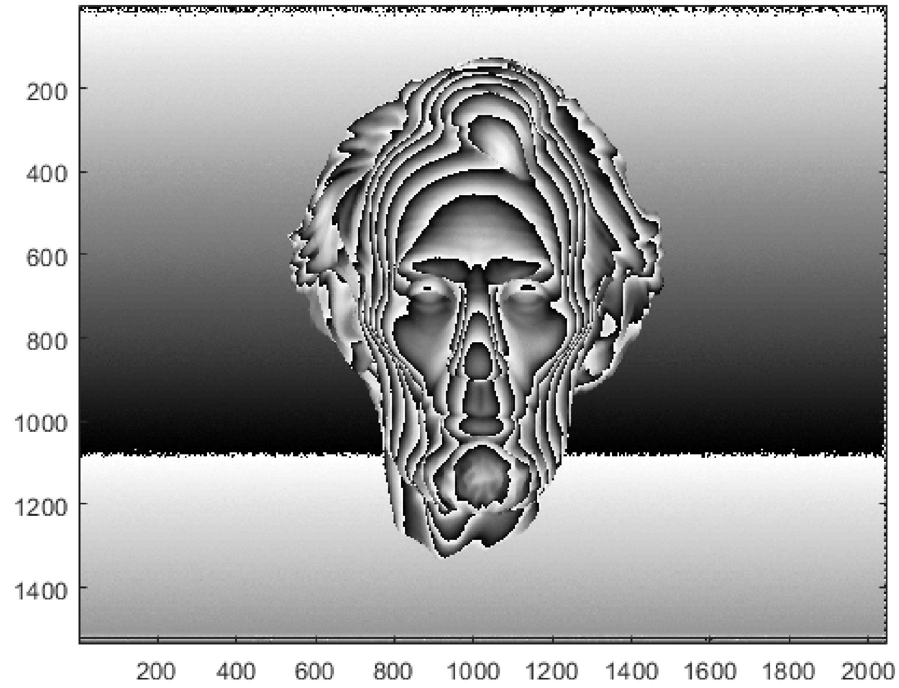
高度分布的计算

$$I_1(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\sin\Phi(x,y)$$
$$I_2(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\sin(\Phi(x,y)+\pi)$$
$$I_3(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\sin(\Phi(x,y)+\delta)$$
$$I_4(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\sin(\Phi(x,y)+\delta+\pi)$$

$$\Phi(\mathrm{x},\mathrm{y})=\mathrm{artan}\left(\frac{\big(I_2(x,y)-I_1(x,y)\big)sin\delta}{\big(I_4(x,y)-I_3(x,y)-I_2(x,y)+I_1(x,y)\big)sin\delta}\right)$$

高度分布的计算

$$\Phi(x,y) \in [-\pi,\ \pi]$$



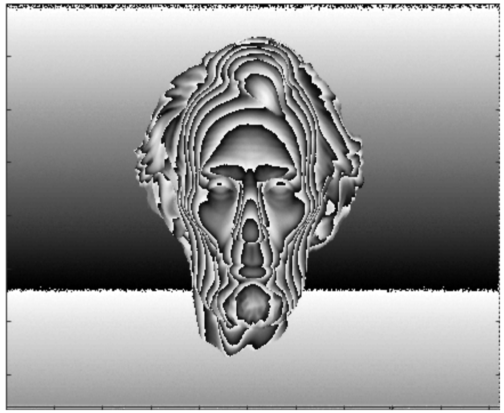
由四张不同相位的莫尔条纹代入相位计算公式得到的折叠相位

高度分布的计算

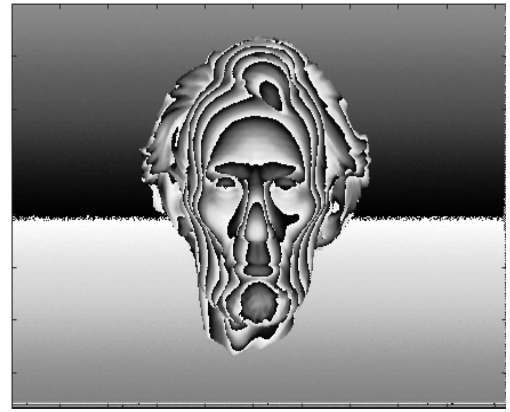
$$\Phi_{12}\begin{cases}\Phi_1(x,y)-\Phi_2(x,y), & \Phi_1>\Phi_2\\ \Phi_1(x,y)-\Phi_2(x,y)+2\pi, & \text{其他}\end{cases}$$

$$\varphi(x,y)=\Phi_1(x,y)+(2\pi)Round\left(\frac{\left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1}\right)\Phi_{12}(x,y)-\Phi_1(x,y)}{2\pi}\right)$$

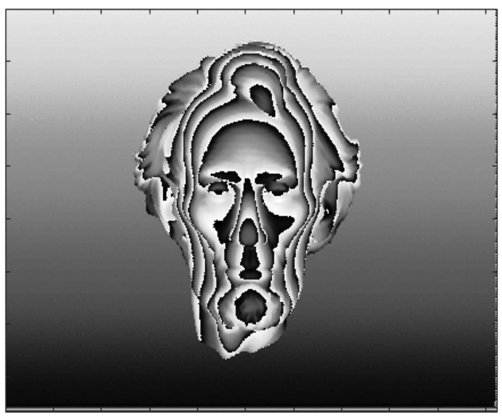
高度分布的计算



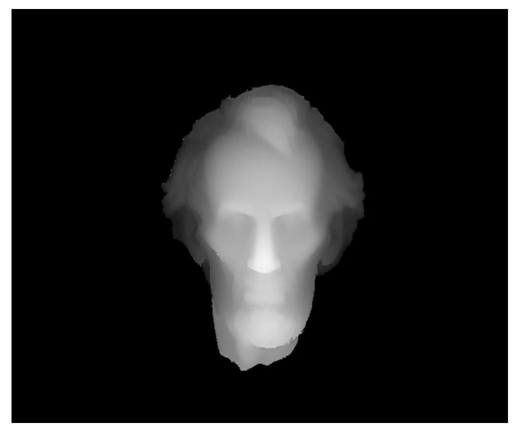
(a)



(b)



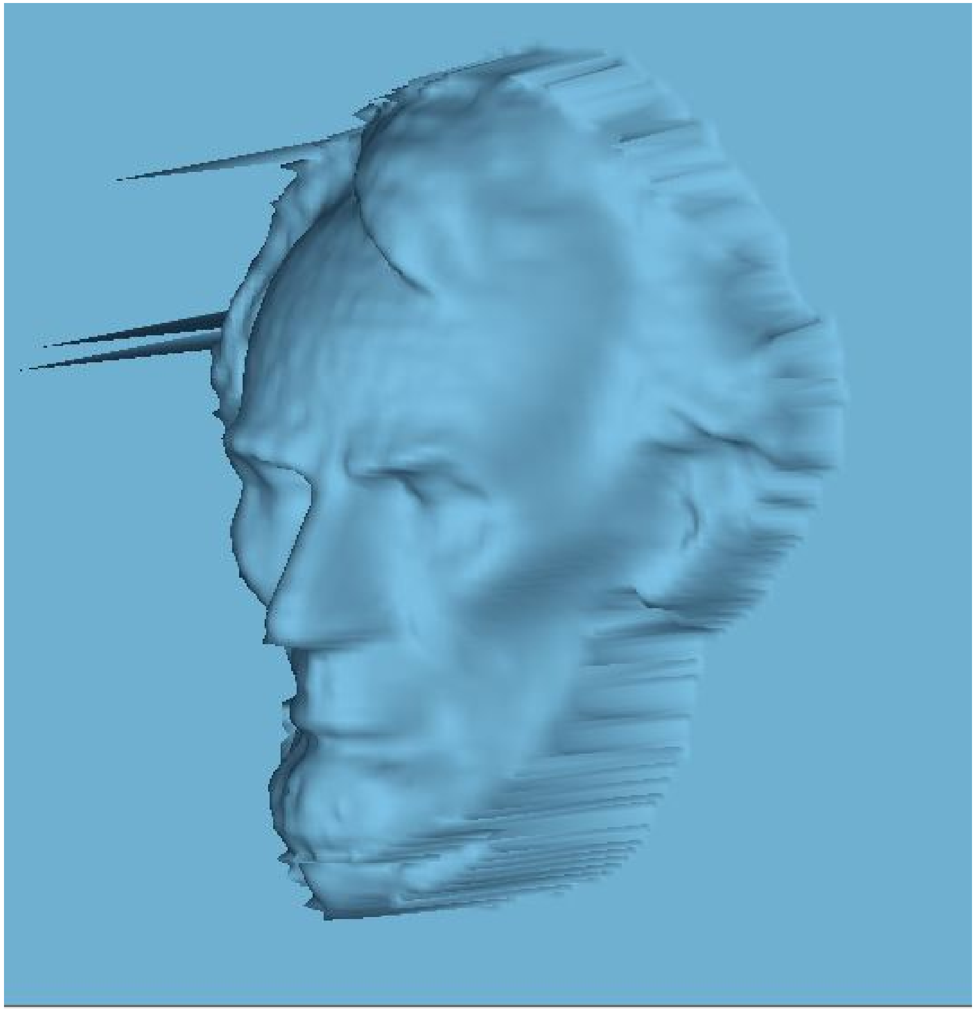
(c)



(d)

林肯脸测量结果：(a)条纹周期6个像素的折叠相位；(b)条纹周期8个像素的折叠相位；(c)条纹周期10个像素的折叠相位；(d)利用莫尔波长得到的展开相位；

高度分布的计算



数字莫尔三维测量方法得到的林肯脸三维重建模型

$$h(x,y) = \frac{\lambda_1}{2\pi}\varphi(x,y)$$

总结

✓相位-高度映射关系
✓数字莫尔条纹的生成：叠加；高频条纹滤除；
✓高度的计算：相位提取；相位展开；高度转换；
□MATLAB自带GPU array 加速
□多种滤波方法的尝试