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 研究背景

② 相位-高度关系

③ 数字莫尔条纹的生成

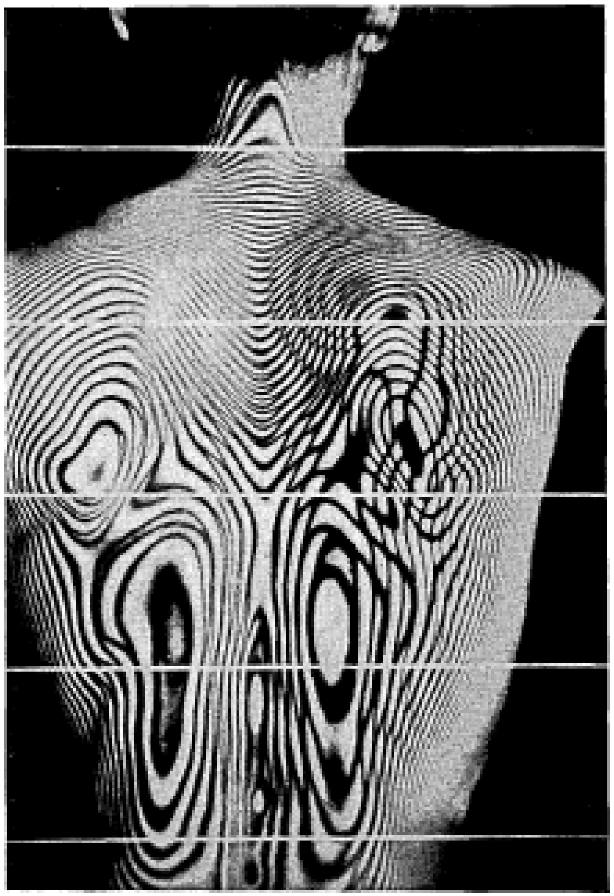
④ 高频条纹的滤除

⑤ 相位分布计算

⑥ 高度转换

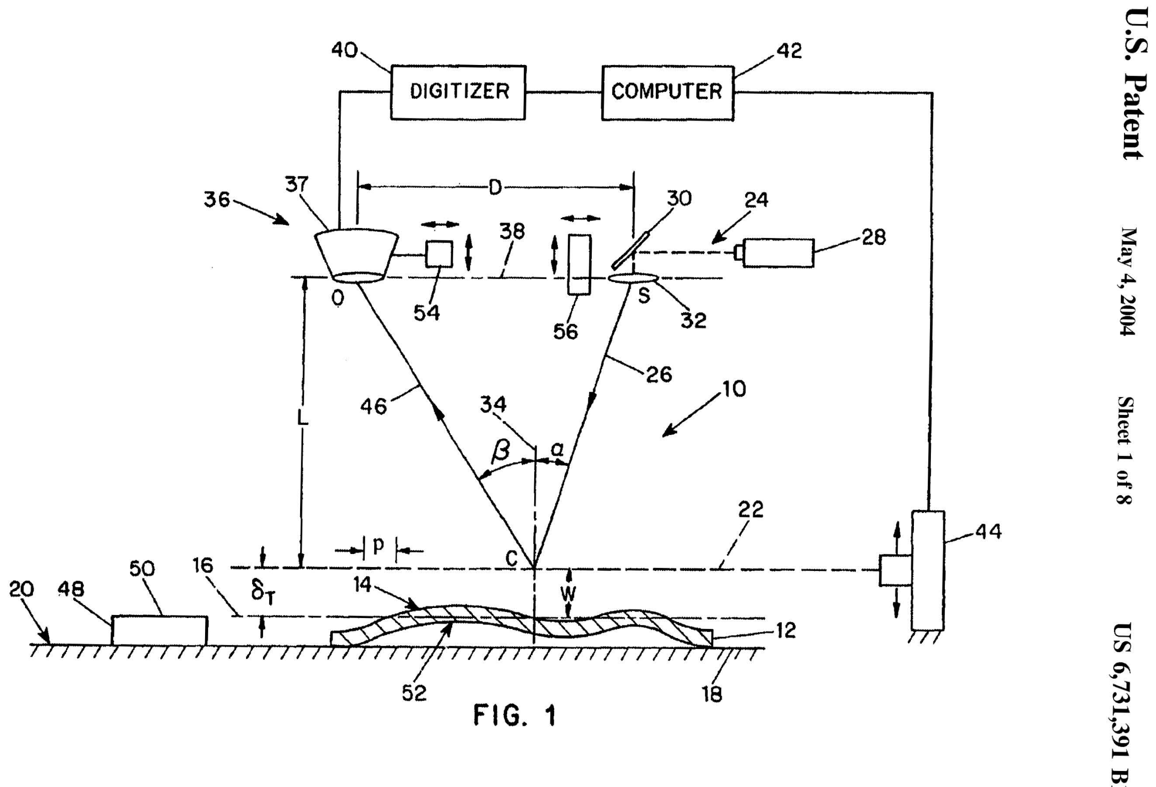
⑦ 总结

研究背景



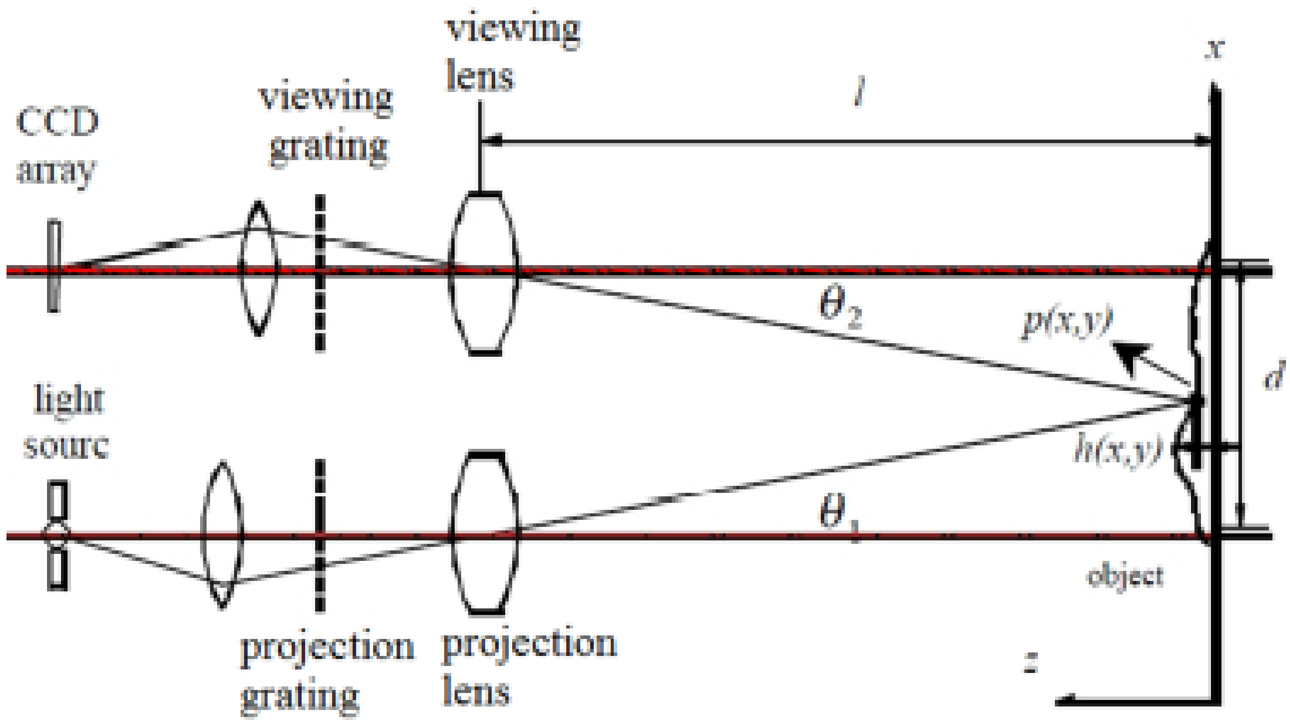
Takasaki, H. (1970). "Moiré topography." Applied Optics **9**(6): 1467-1472.

阴影莫尔三维测量



Kao, Imin, and Fu-Pen Chiang. "Shadow moire surface measurement using talbot effect." U.S. Patent No. 6,731,391. 4 May 2004.

投影莫尔三维测量



(b)

Mohammadi, Fatemeh. "3D optical metrology by digital moiré: Pixel-wise calibration refinement, grid removal, and temporal phase unwrapping." (2017).

深度学习和莫尔三维测量的结合

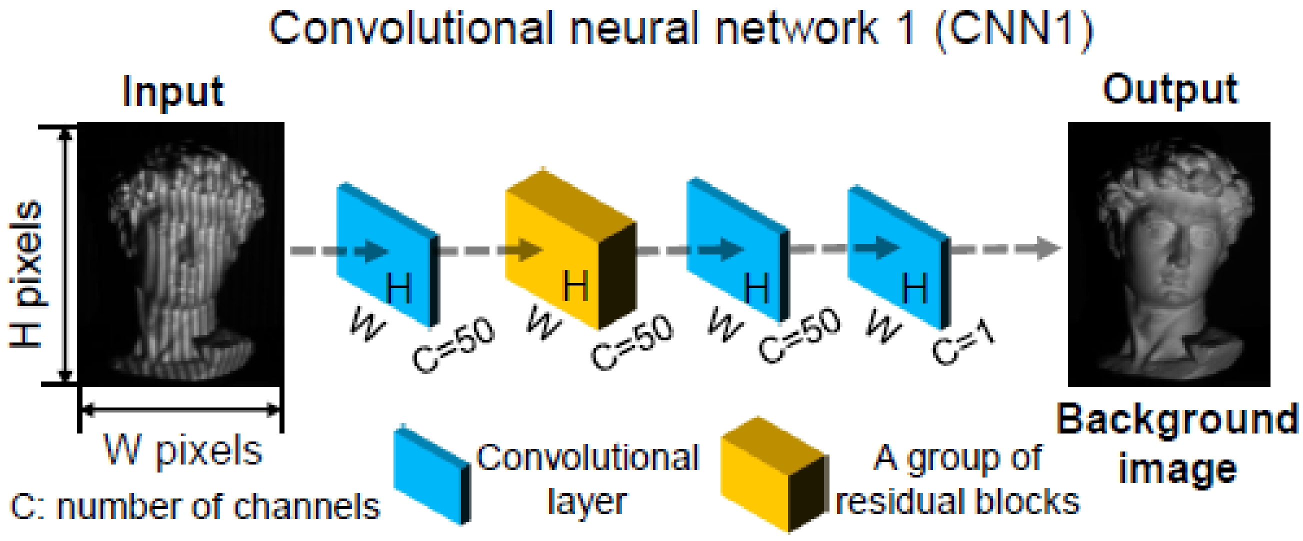


Figure 2. Schematic of our first convolutional network (CNN1).

Feng, Shijie, et al. "Fringe pattern analysis using deep learning." *Advanced Photonics* 1.2 (2019): 025001.

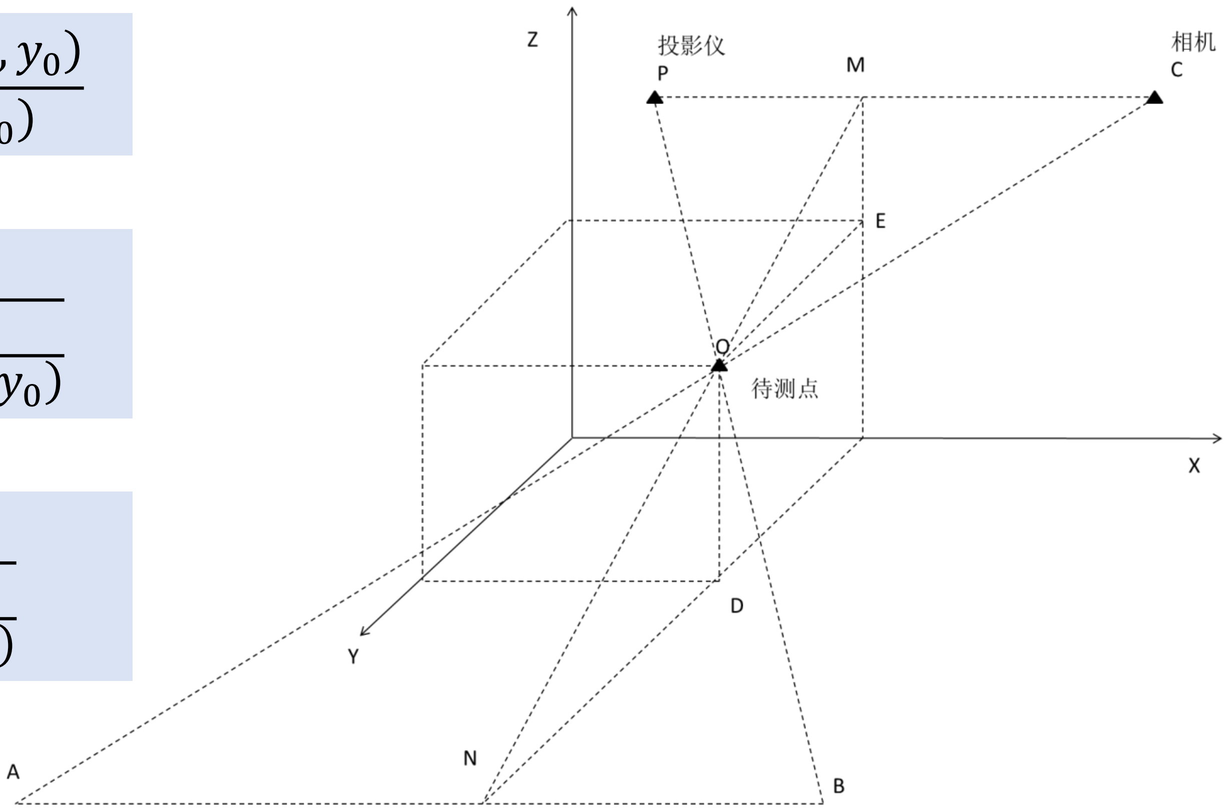
相位-高度关系

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

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

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

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



被测点在X-Z平面之外的三角测量法

相位-高度关系

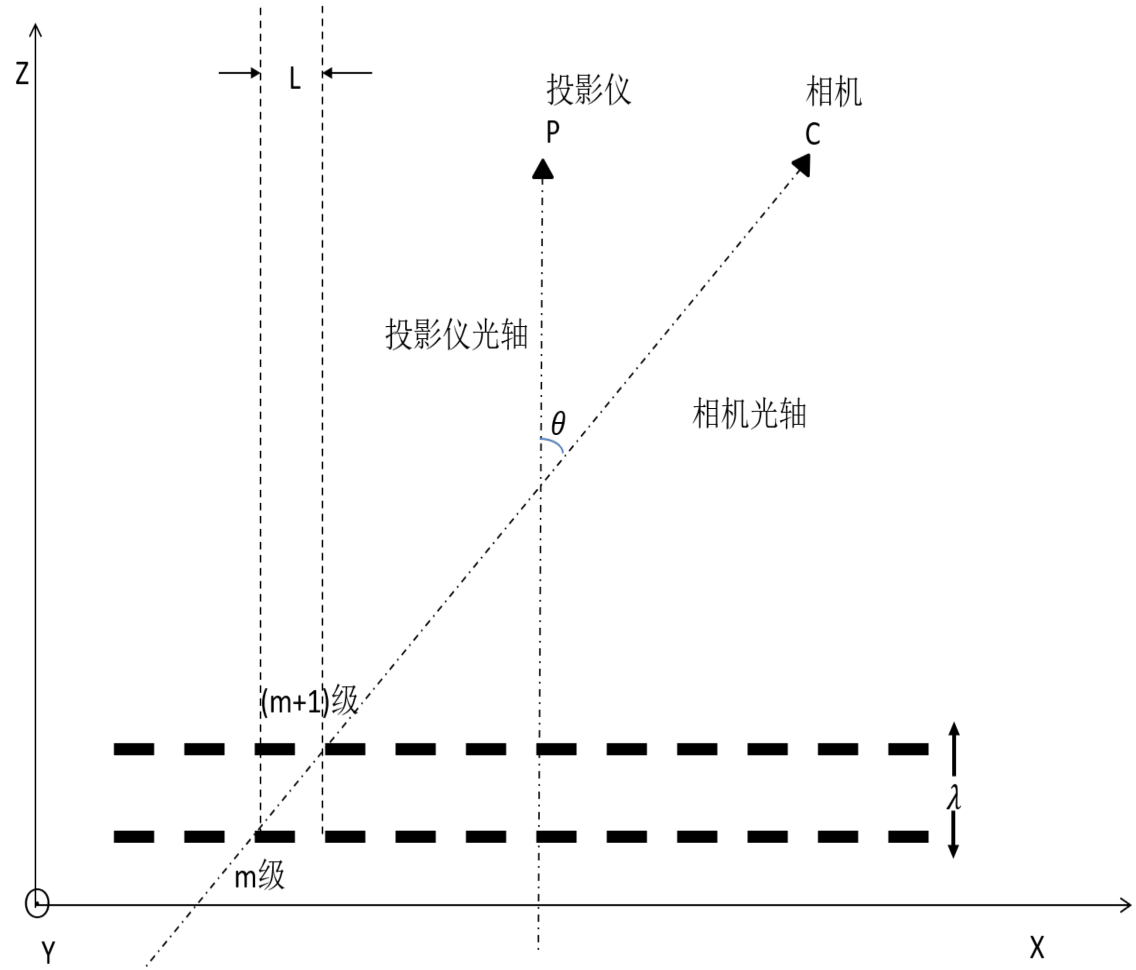
$$h(x,y) = \frac{H}{1 + \frac{2\pi d}{L\Delta\varphi(x,y)}}$$

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

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

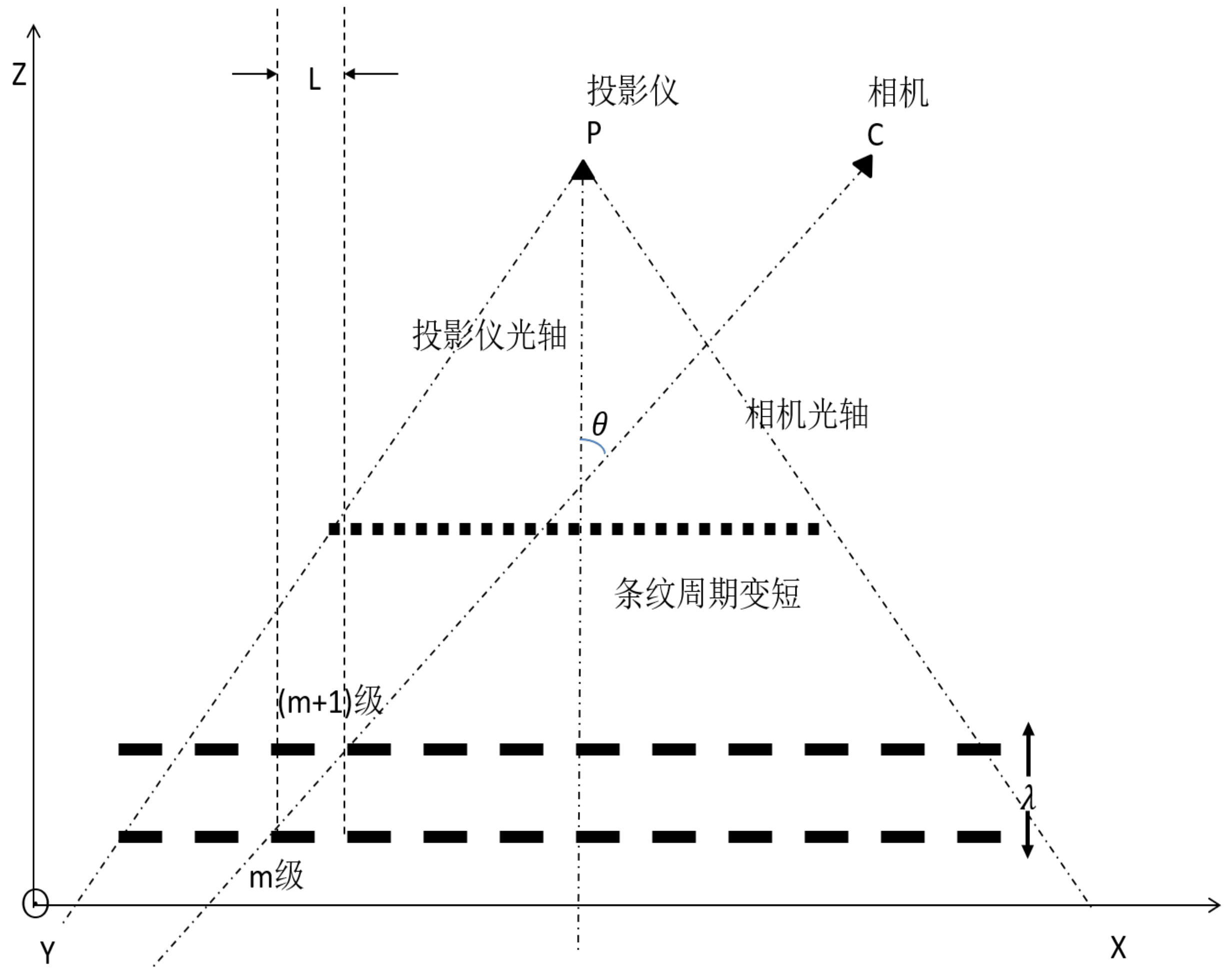
$$K = \frac{\lambda}{2\pi}$$

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



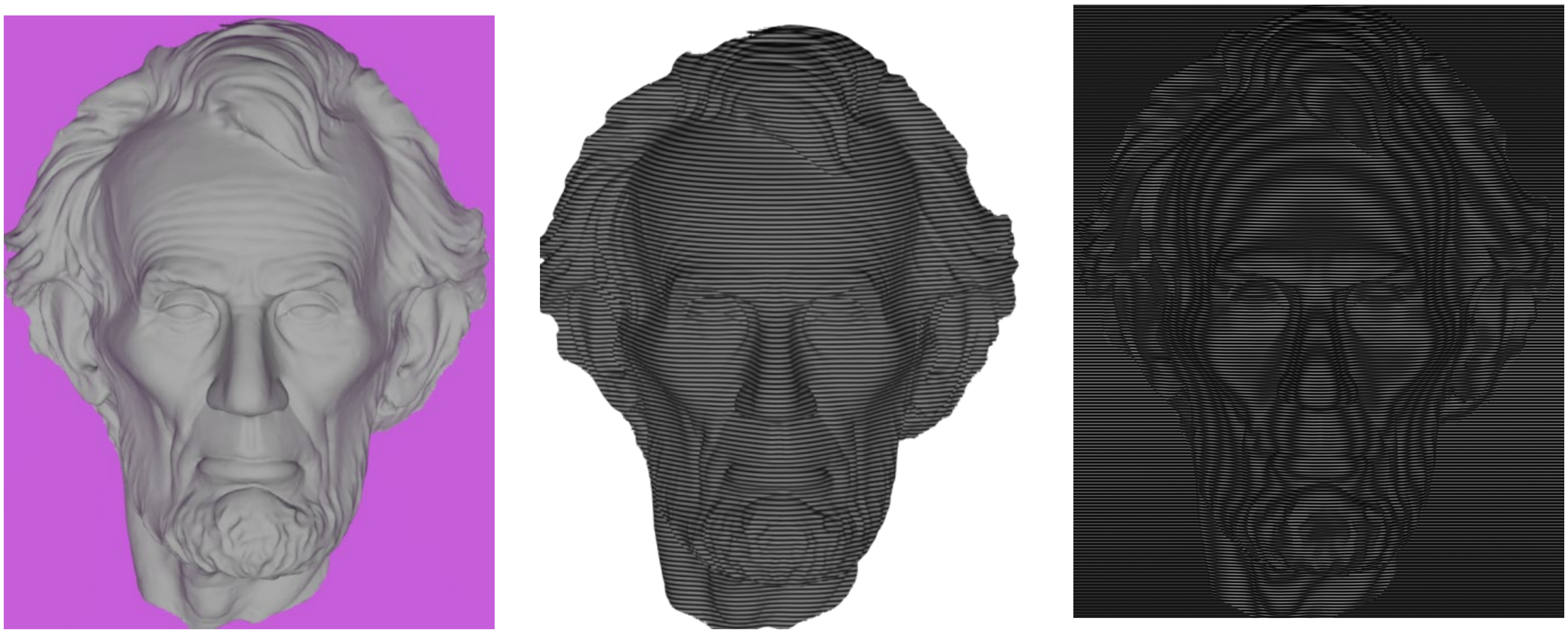
当高度变化较小时，莫尔波长可由投影仪-相机光轴夹角和投影条纹周期确定

相位-高度关系



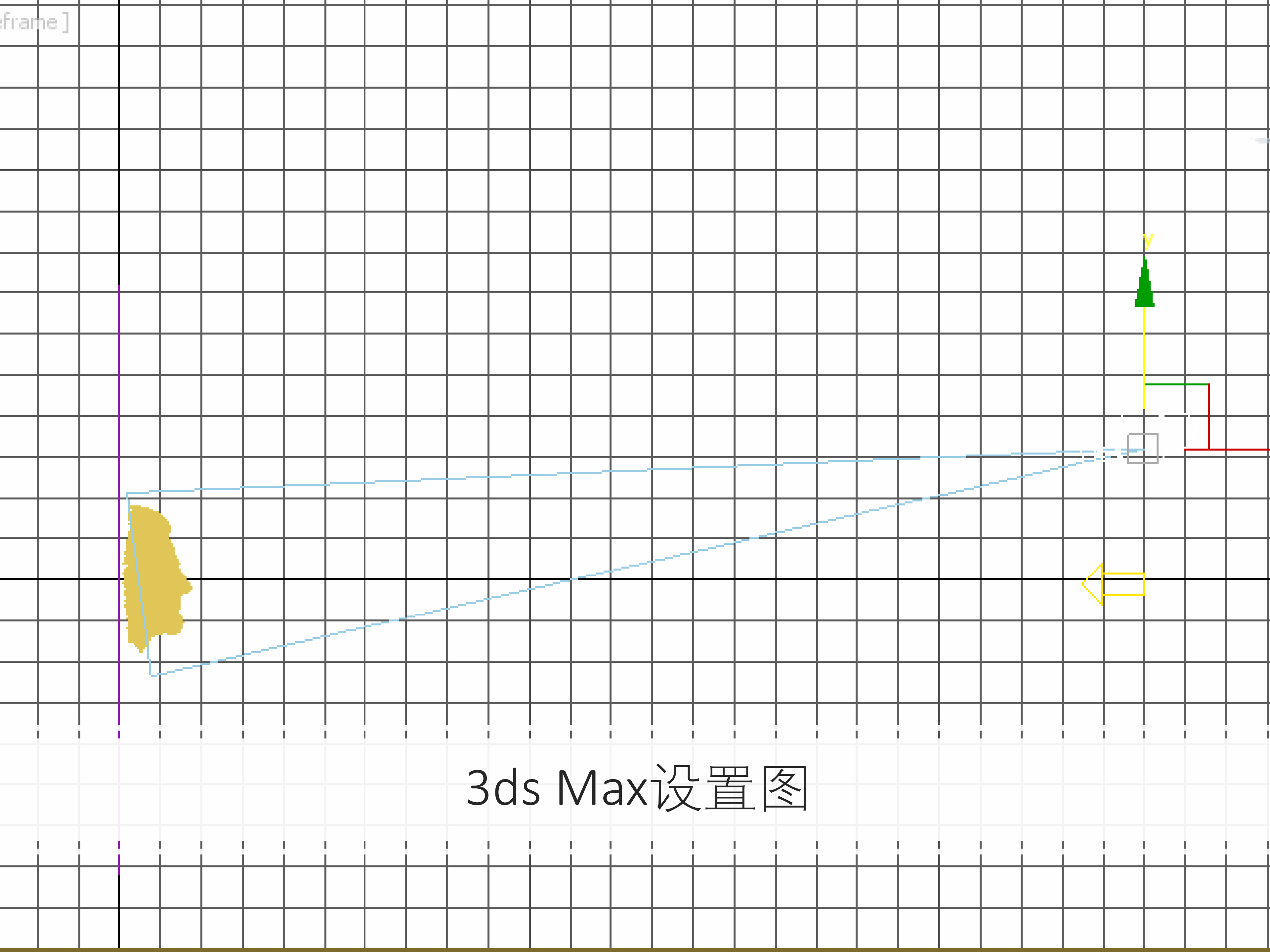
高度变化范围过大，条纹周期L减小，莫尔波长不能视为恒定值

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)

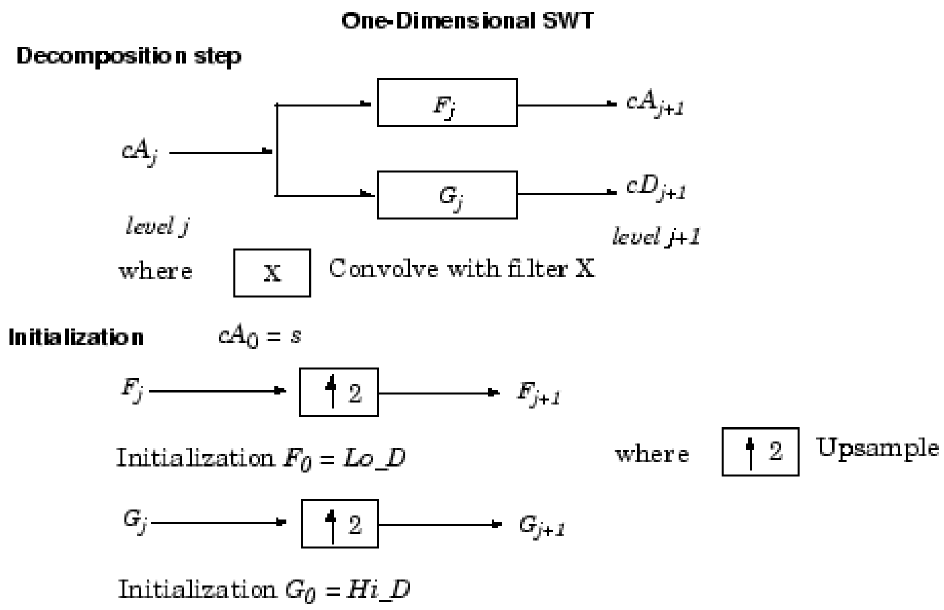
(b)

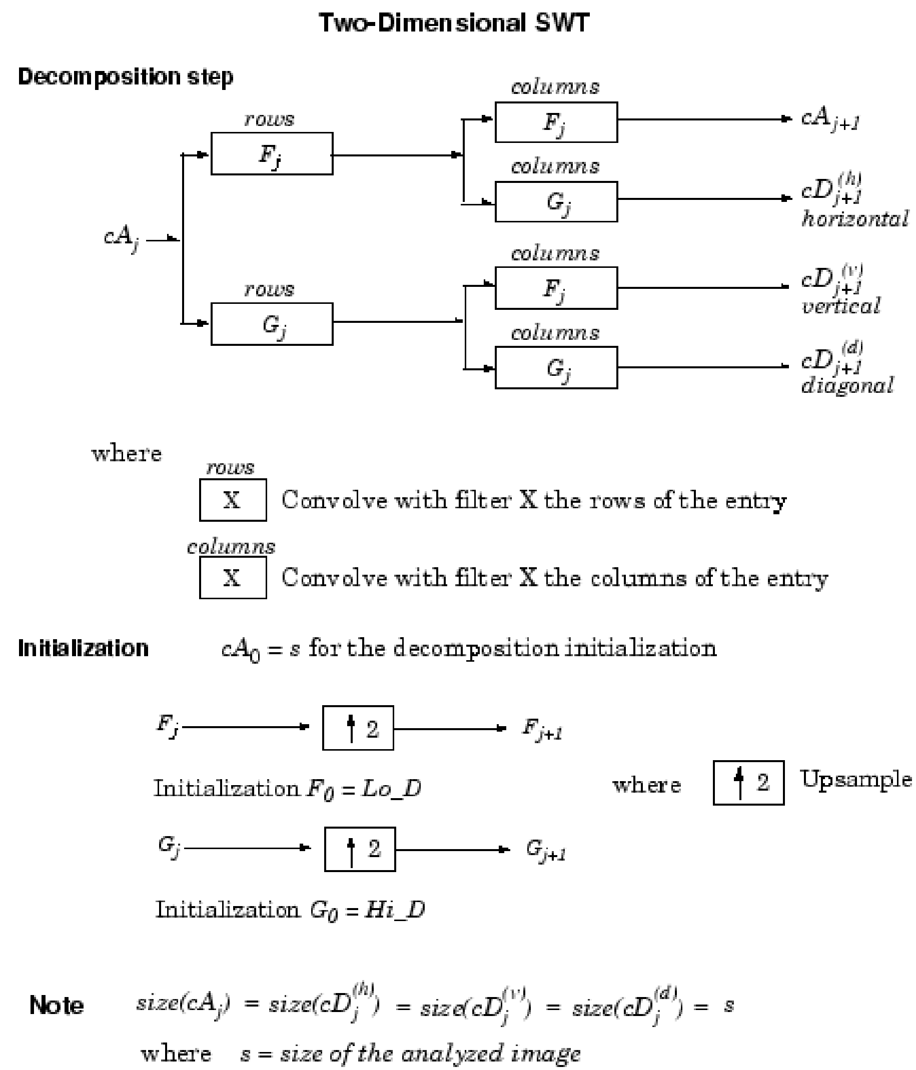
(c)

(d)

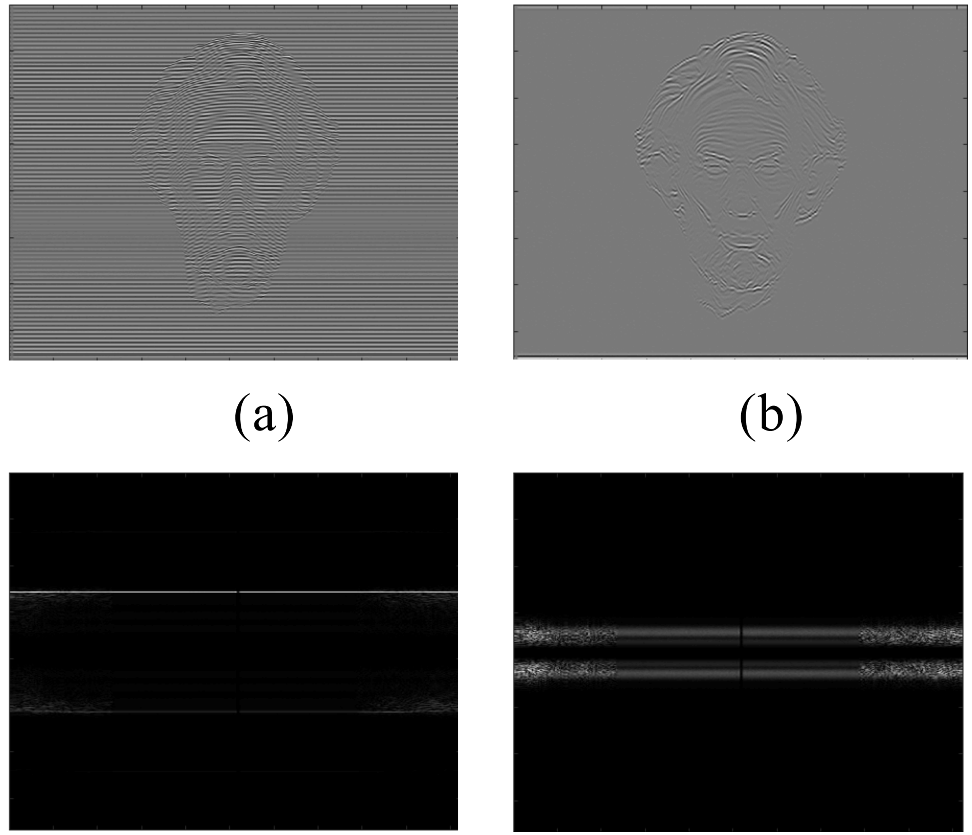
叠加条纹初始相位为0，π，δ，δ + π的，含有高频条纹的莫尔图样

一维和二维平稳小波变化





高频条纹的滤除

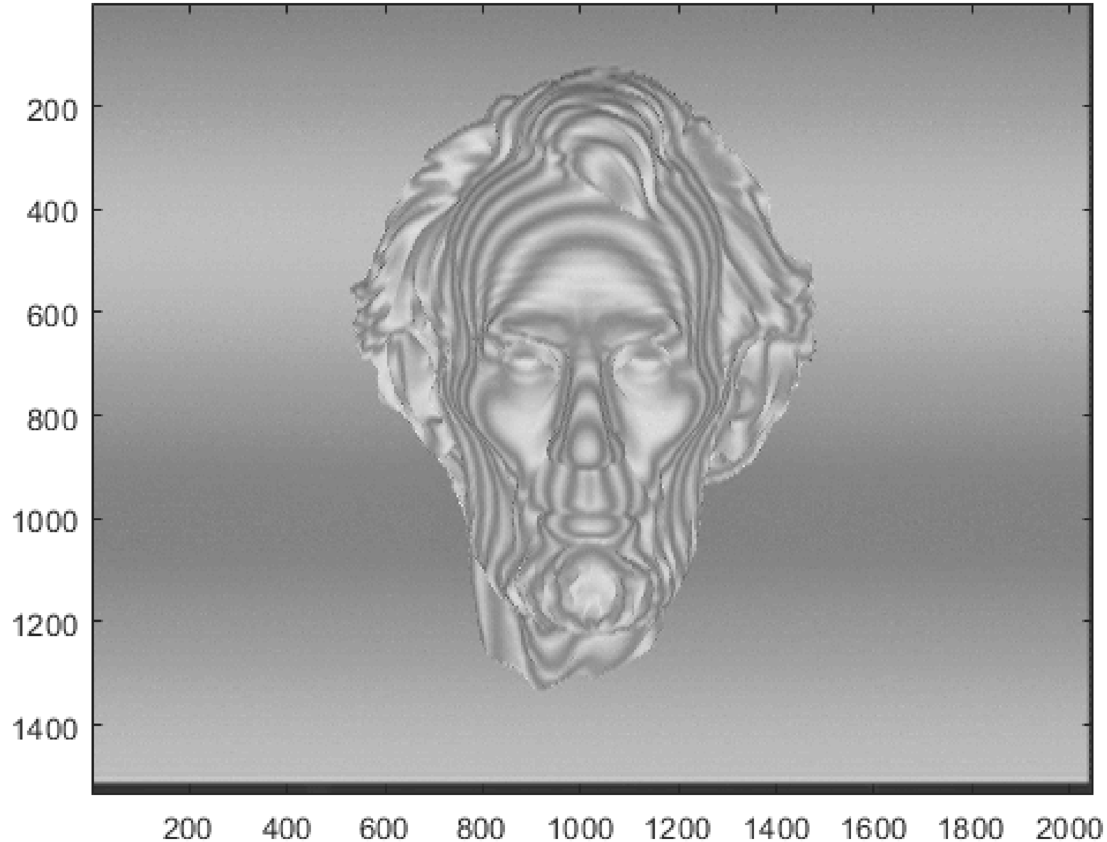


(a) (b)

(c) (d)

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

高频条纹的滤除



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

相位分布计算

(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

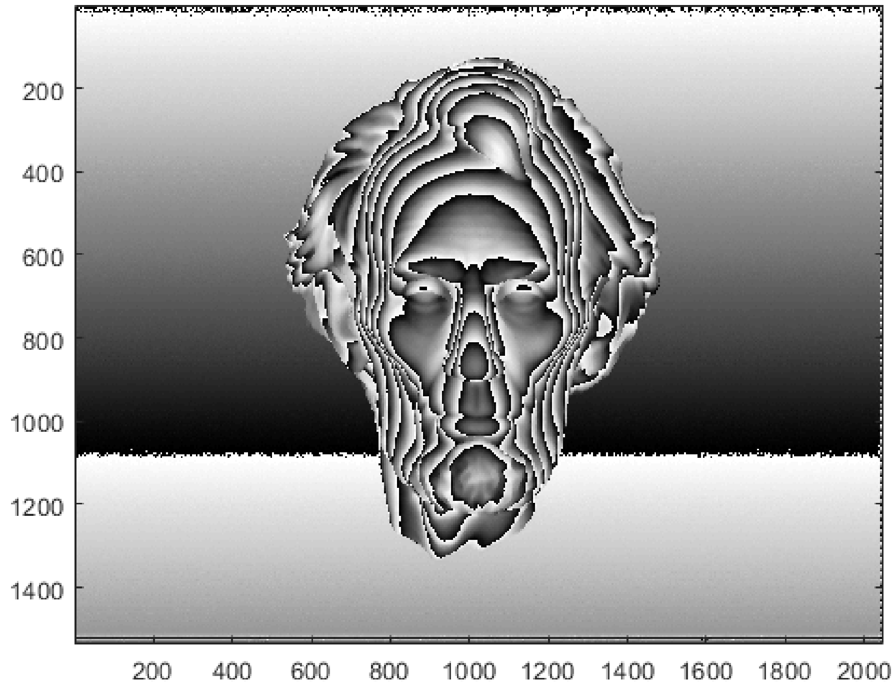
相位分布计算

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

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

相位分布计算

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



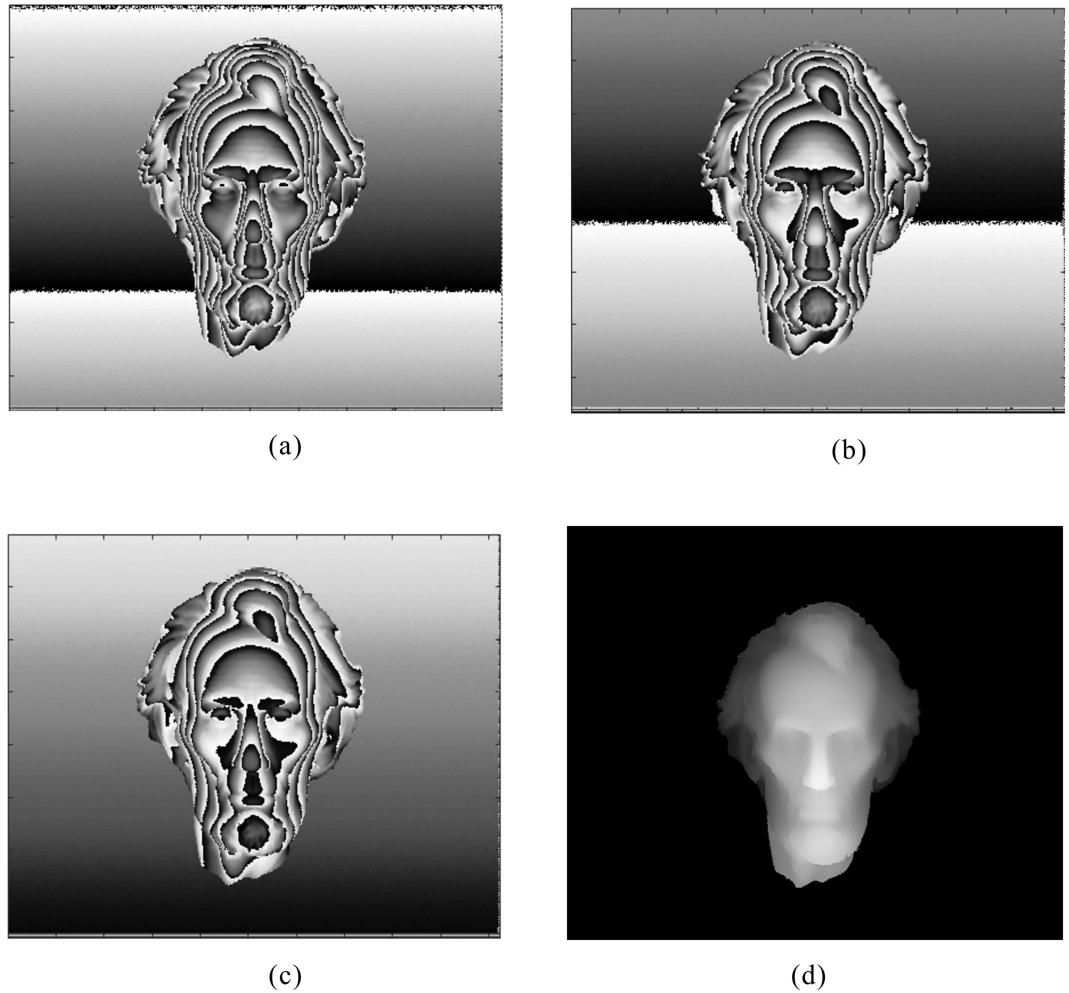
由四张不同相位的莫尔条纹代入相位计算公式得到的折叠相位

相位分布计算

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

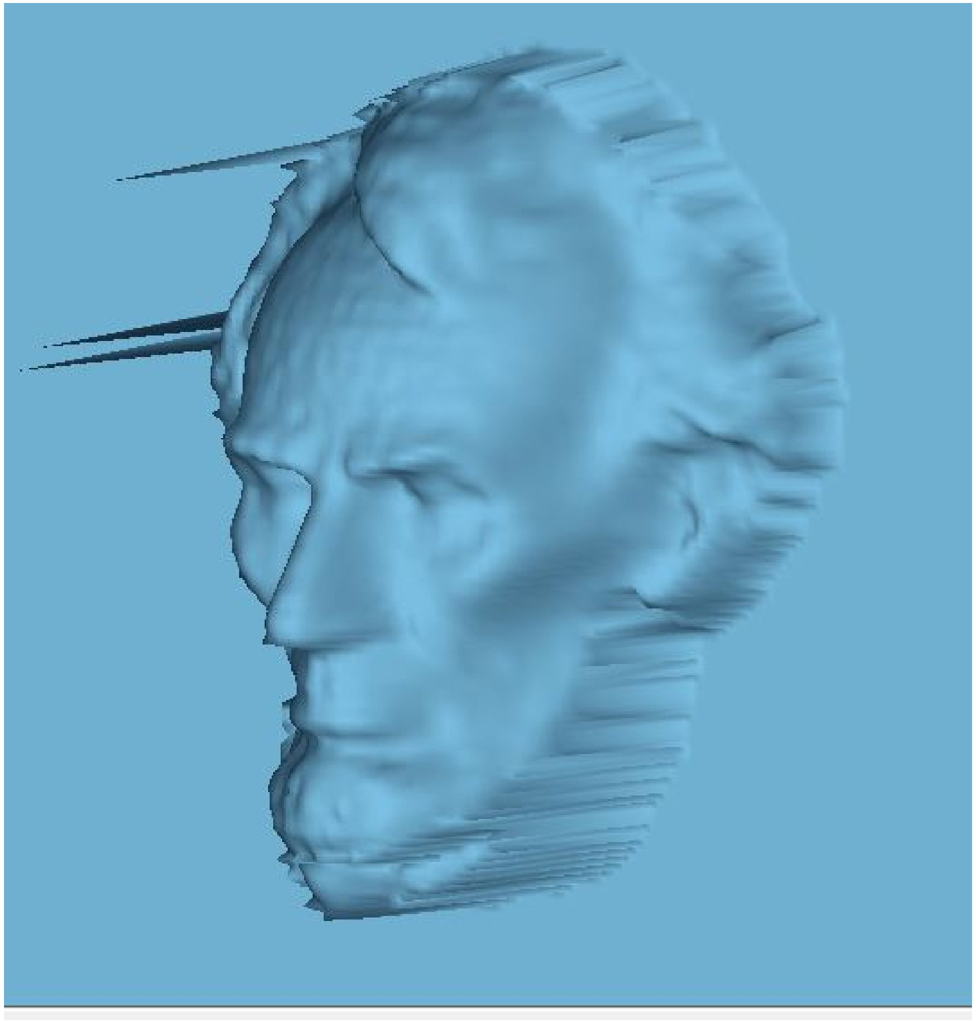
$$\varphi(x,y)=\Phi_1(x,y)+(2\pi)Round\left(\frac{\left(\frac{\lambda_{12}}{\lambda_1}\right)\Phi_{12}(x,y)-\ \Phi_1(x,y)}{2\pi}\right)$$

相位分布计算



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；

高度转换



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