

衍射增强CT的实验方法和数据处理

报告人：张凯

课题组：多学科同步辐射形貌站

报告提纲

1

X射线CT成像技术

2

DEI-CT的原理和实验参数确定

3

数据处理

X射线的发现



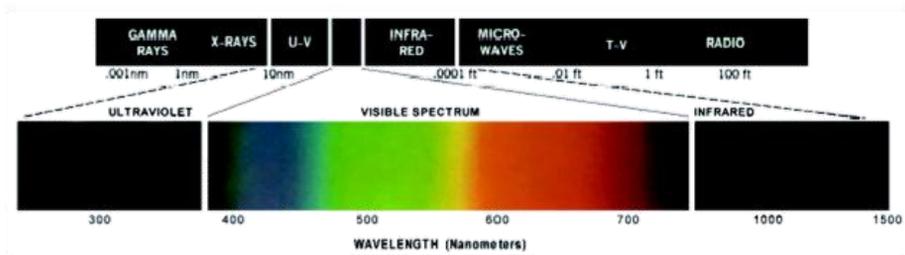
Conrad Roentgen (1845- 1923)

2013-11-27

3

电磁波谱与X射线谱

- X射线是一种电磁波

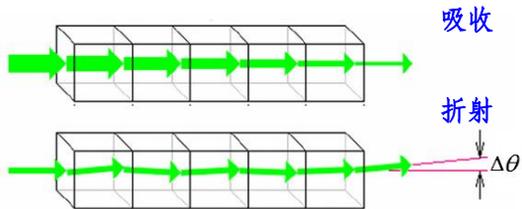
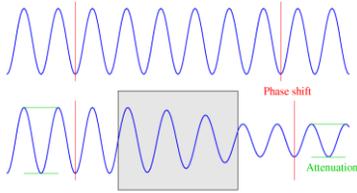


2013-11-27

4

X射线与物质的相互作用

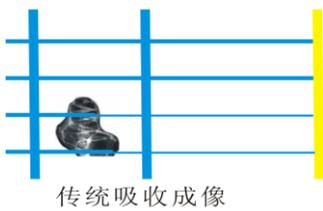
$$U = U_0 \exp(i\phi) \exp(-u)$$



2013-11-27

5

X射线吸收成像VS相位衬度成像



光场振幅的衰减而成像

密度 $1g/cm^3$ 厚度10微米的碳只吸收0.5%



光场相位的改变导致强度的不均匀分布从而成像

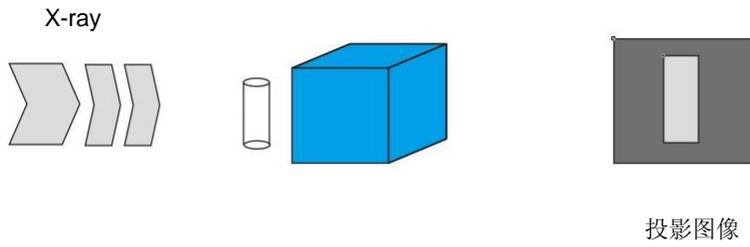
密度 $1g/cm^3$ 厚度10微米的碳可使相位改变 0.3π

2013-11-27

6

X射线成像的局限性

- 传统的X射线成像是二维成像



2013-11-27

7

X射线成像技术与CT技术的结合



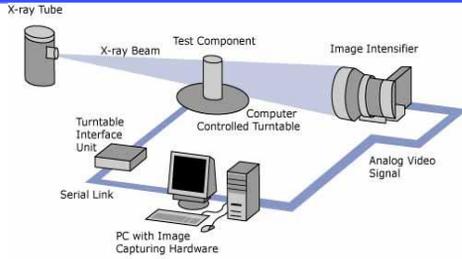
换一个角度来观察



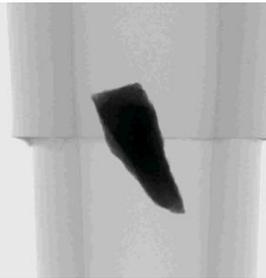
2013-11-27

8

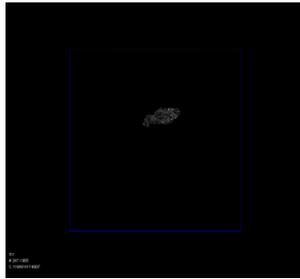
CT技术的工作原理



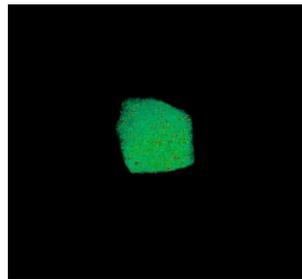
- CT设备主要包括:
1. X射线光源
 2. 样品转台
 3. 探测器



数据采集



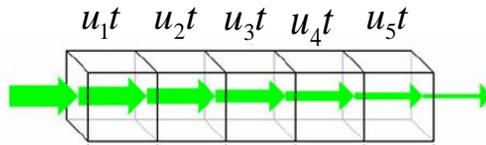
断层重建



3D重建

CT重建的基本原理

CT重建就是求解吸收系数的分布



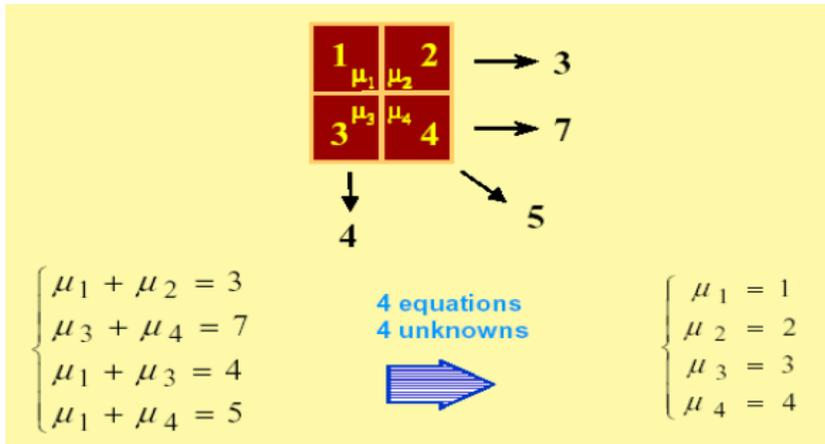
$$I = I_0 e^{\int -u dt}$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_L u dt$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = u_1 + u_2 \cdots u_N$$

投影的定义

CT重建的基本原理



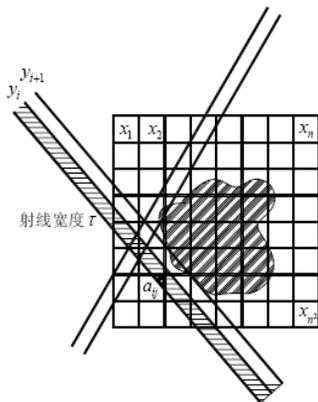
2013-11-27

中国科学院高能物理研究所

11

CT重建的基本原理

迭代算法：速度慢，对噪声有很好的控制能力



$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_3 \end{pmatrix}$$

256*256像素的图像，会产生256*180个方程

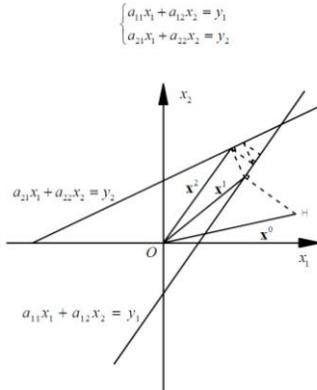
2013-11-27

中国科学院高能物理研究所

12

CT重建的基本原理

迭代算法的原理

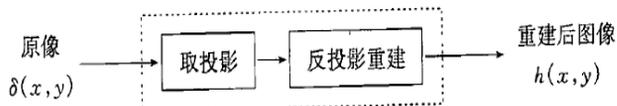


$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{p_{i_k} - r_{i_k} X^{(k)}}{r_{i_k}^2} r_{i_k}^T$$

CT重建的基本原理

解析重建算法：速度快、精确重建，要求数据完备

$$f(x, y) = \int_0^\pi \left[\int_0^\infty F(w, \theta) |w| e^{j2\pi w t} dw \right] d\theta$$



CT重建的基本原理

解析重建算法的原理

- 我们考虑孤立点源反投影重建，中心点A经n条投影线投影后，投影值均为1:

$$p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1$$

因此重建后

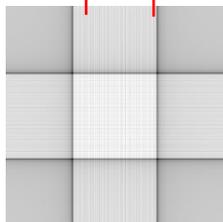
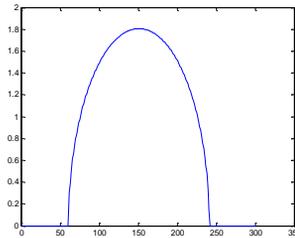
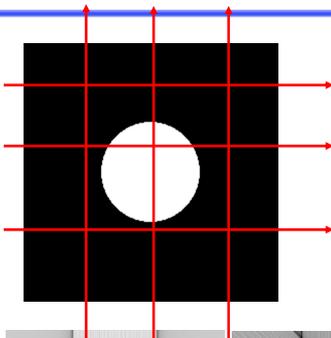
$$f_A = \frac{1}{n}(p_1 + p_2 + \dots + p_n) = 1$$

而其他点均为1/n
这类伪迹成为星状伪迹

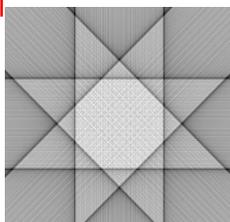
0	0	0
0	1	0
0	0	0

1/n	1/n	1/n
1/n	1	1/n
1/n	1/n	1/n

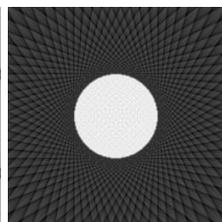
CT重建的基本原理



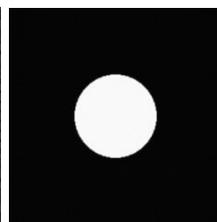
2个投影



4个投影



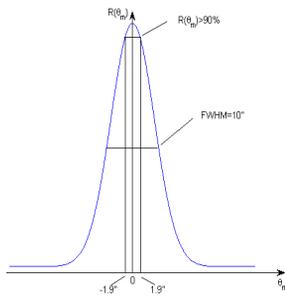
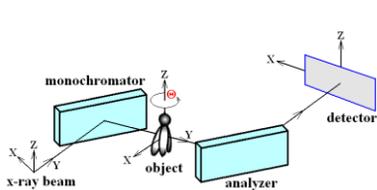
36个投影



180个投影

2 DEI-CT的原理和实验参数确定

衍射增强CT实验平台-DEI-CT

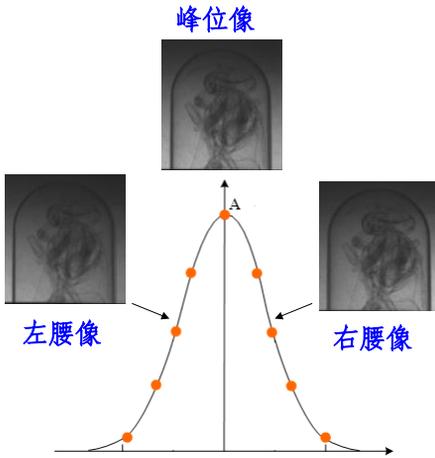


单色器晶体 样品转台 分析晶体



$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^t \mu(x', y', z') dy - \int_0^t \chi(x', y', z') dy\right) R(\theta_A + \theta)$$

衍射增强CT的原理



左、右半腰像:

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^t \mu(x', y', z') dy - \int_0^t \chi(x', y', z') dy\right) R\left(\theta_A - \frac{\theta_D}{2}\right)$$

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^t \mu(x', y', z') dy - \int_0^t \chi(x', y', z') dy\right) R\left(\theta_A + \frac{\theta_D}{2}\right)$$

峰位像:

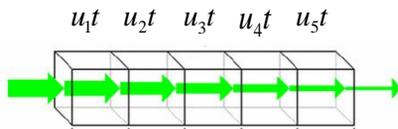
$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^t \mu(x', y', z') dy - \int_0^t \chi(x', y', z') dy\right) R(\theta_A)$$

折射像:

$$\theta = \frac{1}{C_L} \frac{I_L - I_H}{I_L + I_H}$$

衍射增强CT的原理

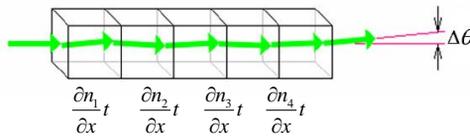
传统吸收CT:



$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = u_1 + u_2 \cdots u_N$$

投影的定义

相位衬度折射CT:



$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\partial n_1}{\partial x} + \frac{\partial n_2}{\partial x} + \frac{\partial n_3}{\partial x} \cdots \frac{\partial n_n}{\partial x} \\ &= \frac{1}{C_L} \frac{I_L - I_H}{I_L + I_H} \end{aligned}$$

峰位CT:

$$\ln \frac{I_0}{I} = (\mu_1 + \chi_1) + (\mu_2 + \chi_2) \cdots (\mu_n + \chi_n)$$

衍射增强CT的原理

折射衬度CT重建公式:

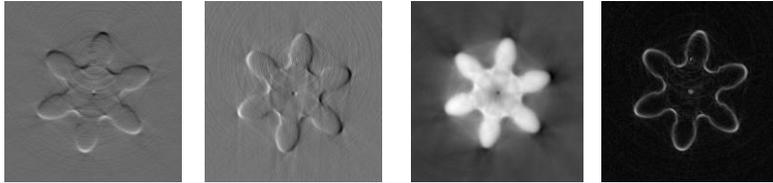
$$n(x, y, z) = \int_0^\pi d\Theta \int_{-\infty}^{\infty} \left[\theta_r(x_r, \Theta, z) * \frac{1}{2\pi^2 x_r} \right] \delta(x \cos \Theta + y \sin \Theta - x_r) dx_r$$

$$\frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} = \int_0^\pi \cos \Theta d\Theta \int_{-\infty}^{\infty} \left[\theta_r(x_r, \Theta, z) * F^{-1}\{|u|\} \right] \delta(x \cos \Theta + y \sin \Theta - x_r) dx_r$$

$$\frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} = \int_0^\pi \sin \Theta d\Theta \int_{-\infty}^{\infty} \left[\theta_r(x_r, \Theta, z) * F^{-1}\{|u|\} \right] \delta(x \cos \Theta + y \sin \Theta - x_r) dx_r$$

$$\frac{\partial n(x, y, z)}{\partial z} = \int_0^\pi d\Theta \int_{-\infty}^{\infty} \left[\theta_z(x_r, \Theta, z) * F^{-1}\{|u|\} \right] \delta(x \cos \Theta + y \sin \Theta - x_r) dx_r$$

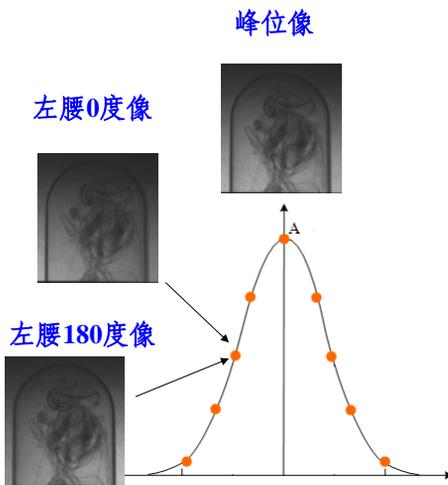
$$|\nabla n(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)^2}$$



2013-11-27

21

衍射增强CT的原理



$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\partial n_1}{\partial x} + \frac{\partial n_2}{\partial x} + \frac{\partial n_3}{\partial x} \dots \frac{\partial n_n}{\partial x} \\ &= \frac{1}{C_L} \frac{I_L - I_H}{I_L + I_H} \\ &= \frac{1}{C_L} \frac{I_L(\Theta) - I_L(\Theta + \pi)}{I_L(\Theta) + I_L(\Theta + \pi)} \end{aligned}$$

只需要在半腰位置360度旋转样品, 即可获得样品在0~180度范围内的投影像。

2013-11-27

22

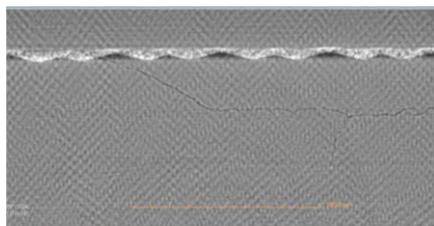
探测器的选择



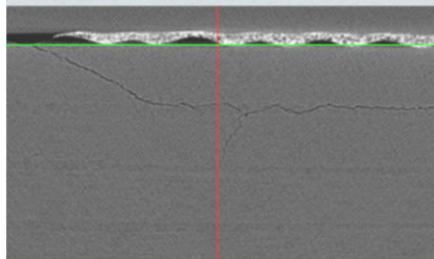
了解探测器的像素尺寸，一般情况下像素尺寸的2~3倍是实际空间分辨率。

投影数目的选择

720张投影数据



2000张投影数据



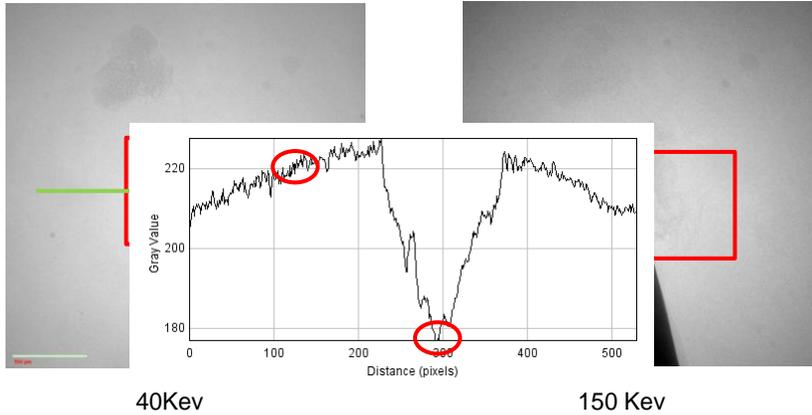
Application	Ns	Np
Nuc Med	64	101
Nuc Med	128	201
x-ray CT	512	804
x-ray CT	1024	1608

投影数目：

$$\frac{\pi}{2} * N$$

N为样品直径，用像素数表示

能量的选择



40Kev

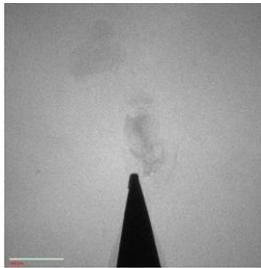
150 Kev

透过率=未被吸收的/直通光: 20%~30%

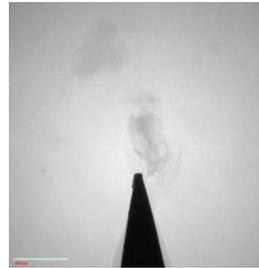
2013-11-27

25

曝光时间的设定

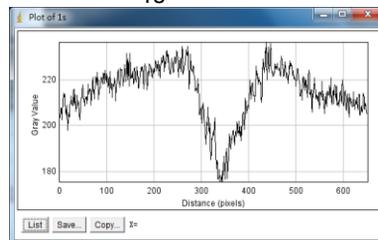
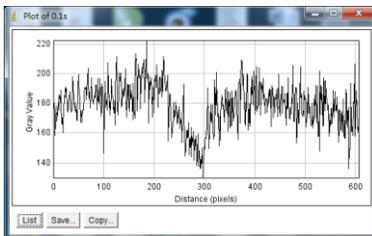


0.1s



1s

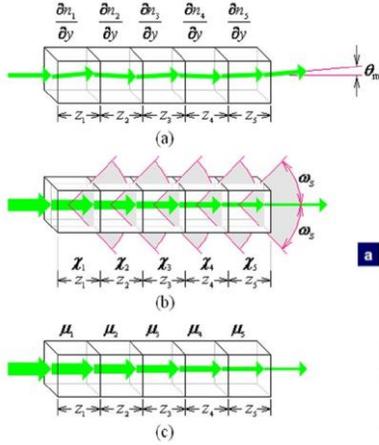
16bit探测器:
10000光子数
12bit探测器:
3000光子数



2013-11-27

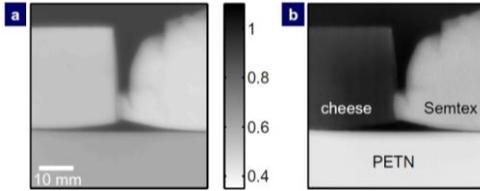
26

衍射增强的信息分离方法



光强方程:

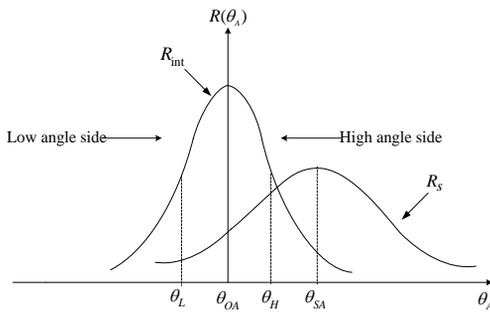
$$I_H = I_0(1 - \bar{\mu}t - \bar{\chi}t)R\left(\frac{\theta_D}{2} + \theta_m\right) + I_0\bar{\chi}t\frac{\theta_D}{2\omega_S}$$



吸收像

散射像

衍射增强的信息分离方法



吸收系数: $u_t t = -\ln\left(\frac{\Omega}{\omega_{int}}\right)$

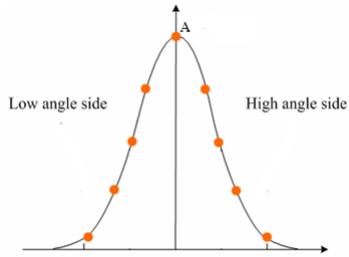
消光系数: $\chi t = -\ln(I_{peak}/I_0) + u_t t$

散射宽度: $\omega_s = \sqrt{\omega_R^2 - \omega_t^2}$

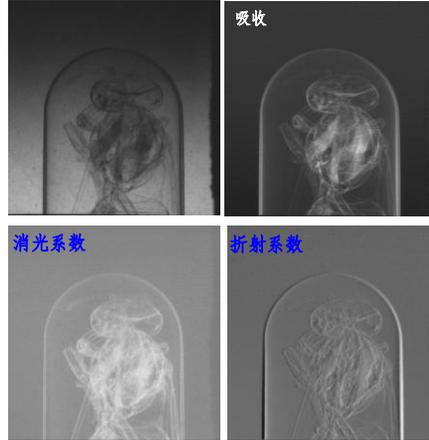
折射角: $\theta = \theta_{OA} - \theta_{SA}$

衍射增强的信息分离方法

实验过程:



光路中放置样品和不放置样品时，
旋转分析晶体采集两套数据



3

数据处理

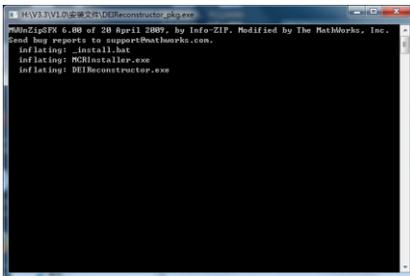
DEIreconstructor的使用



推荐配置：64位操作系统，8G以上内存，4核以上CPU
 最低配置：32位操作系统，2G内存，单核CPU

DEIreconstructor的使用

● 软件安装



双击DEIReconstor_pkg.exe文件



DEIreconstructor的使用

使用说明书

重建程序

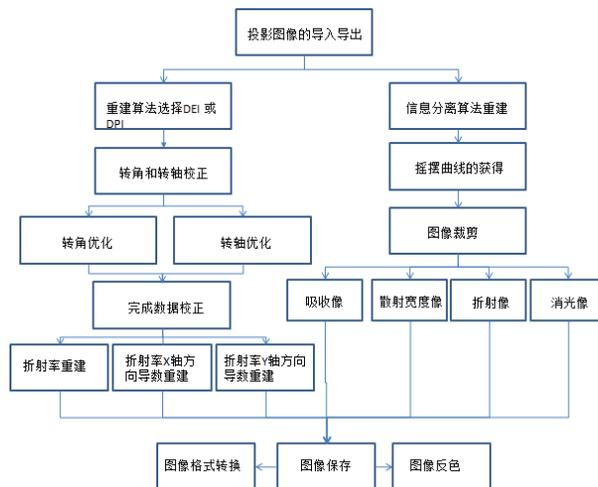
名称	修改日期	类型
distrib	2013/11/14 14:46	文件夹
src	2013/11/14 14:46	文件夹
DEI_user_guide_Version3.6	2012/12/18 10:05	Microsoft Word ..
DEIReconstructor	2012/12/18 10:18	应用程序
DEIReconstructor.prj	2012/12/18 10:20	PRJ 文件
DEIReconstructor_pkg	2012/12/18 10:21	应用程序
MCRInstaller	2012/2/9 21:43	应用程序
readme	2012/12/18 10:18	文本文档

2013-11-27

33

DEIreconstructor的使用

● 软件工作流程

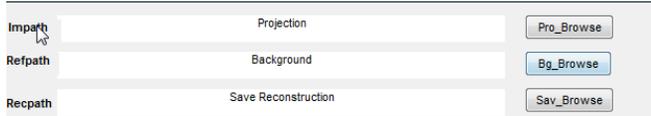


2013-11-27

34

DEIreconstructor的使用

- 数据导入和显示

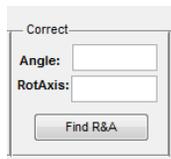


Play 菜单



DEIreconstructor的使用

- 数据校正: correct菜单, optimization菜单



通过计算得到一个理论值:
Angle 和 RotAxis

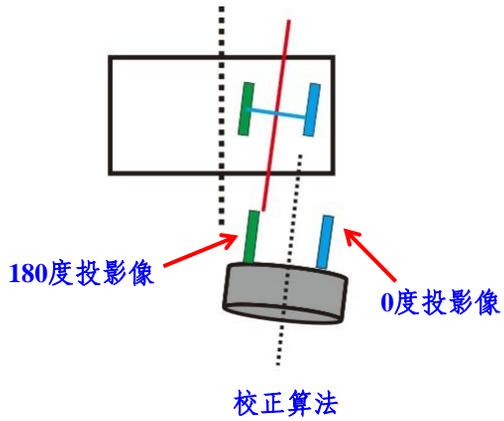
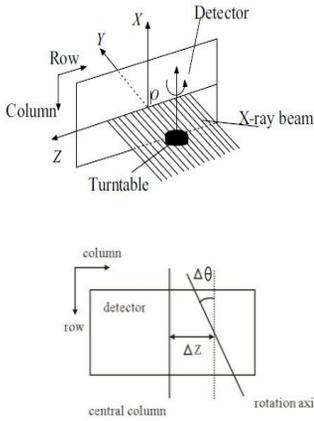


通过扫描的方法对 Angle 和
RotAxis 进行优化。

例子: 理论计算得到 Angle=1
那么在 Angle=0.8~1.2 之间分
别重建, 确定 Angle 的最佳值。

DEIreconstructor的使用

● 转轴校正

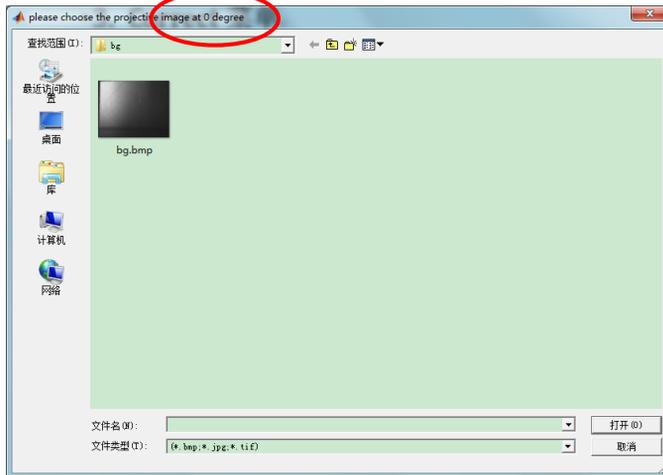


2013-11-27

37

DEIreconstructor的使用

选择转台在0° 下采集的样品投影数据

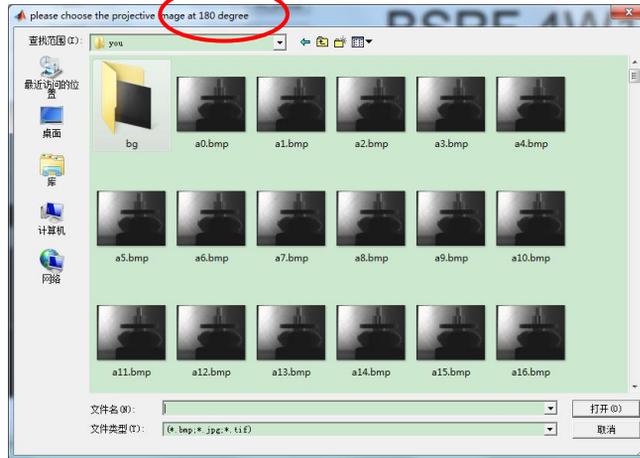


2013-11-27

38

DEIreconstructor的使用

选择转台在180° 下采集的样品投影数据

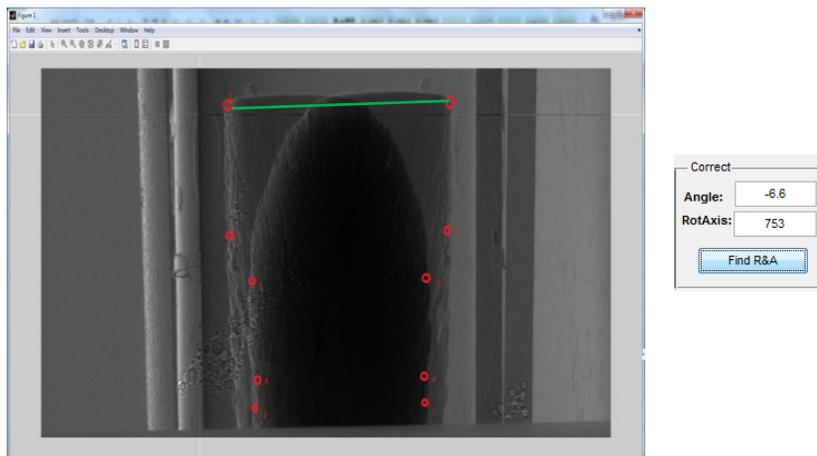


2013-11-27

39

DEIreconstructor的使用

选择五组对称的特征点，自动计算出Angle 和RotAxis

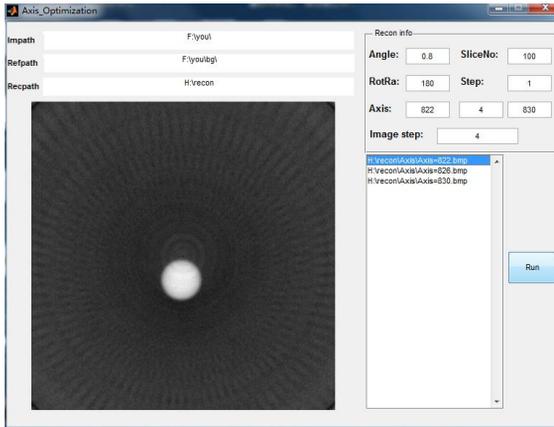


2013-11-27

40

DEIreconstructor的使用

- 转轴优化界面，重建界面



Angle: 角度误差值

SliceNo: 重建第几层

RotRa: 采集CT数据时样品选择角度

Step: 采集CT数据时样品采样间隔

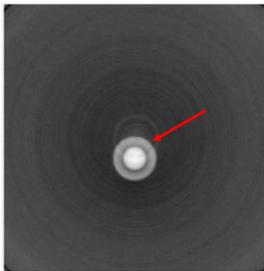
Axis: 转轴扫描重建选择

Image Step: 利用多少重建数据进行重建，4，即利用1/4的输入数据重建。越大重建质量越差，速度越快！

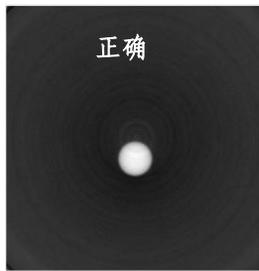
DEIreconstructor的使用

- 转轴最佳值判断 (DEI-CT) :

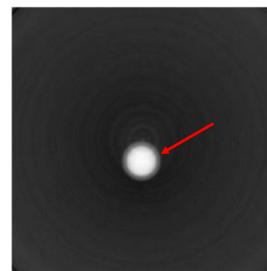
转轴错误，会发生重影现象！



转轴: 810



转轴: 823

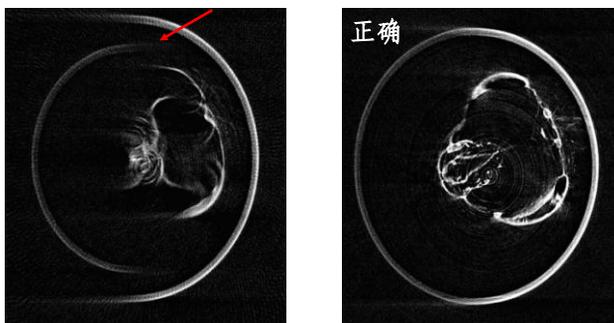


转轴: 830

DEIreconstructor的使用

- 转轴最佳值判断 (DPI-CT) :

转轴错误, 重建图像会不闭合!

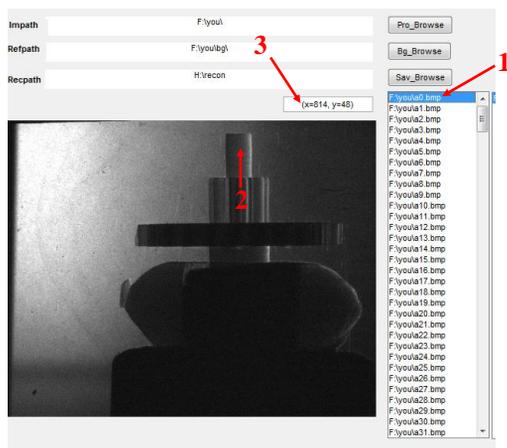


2013-11-27

43

DEIreconstructor的使用

- 快速找转轴, 适合样品衬度差, 无法利用Correct菜单找到特征点情况。

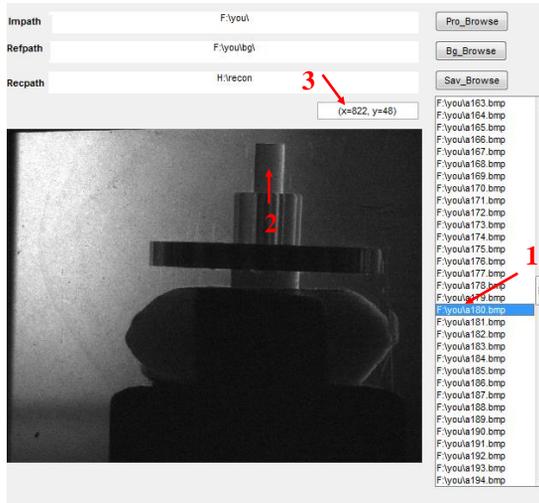


1. 打开0度下投影图像图片
2. 选取样品上某一点
3. 读取 X_0 坐标值

2013-11-27

44

DEIreconstructor的使用



1. 打开180度下投影图像图片
2. 选取样品上某一点
3. 读取X₁₈₀坐标值

2013-11-27

45

DEIreconstructor的使用

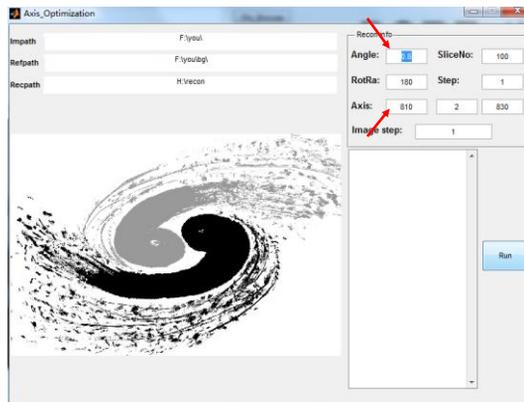
- 得到转轴坐标的估计值

$$X = (X_0 + X_{180}) / 2$$

通常转台的角度误差小于1度

直接在 Optimization菜单中，
打开 RotAxis 对话框，

在Angle中输入1
在Axis中输入X附近的值进行
扫描重建，查找最优化的转轴
值

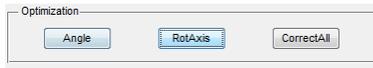


2013-11-27

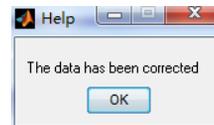
46

DEIreconstructor的使用

- 找到转轴和转角后，点击Optimization菜单中的 CorrectAll选项，打开菜单



- 输入Angle 和Axis 值，点击Run完成数据校正。软件会提示校正完毕



DEIreconstructor的使用

重建信息输入框: Recon info



Rotat Range: 采集CT数据时样品的旋转范围，一般情况下都填180，表示样品在CT数据采集过程中，从0° 旋转到180° 。

Step: 采集CT数据的过程中，投影数据的采样间隔，1即为1°

Slice Num: 重建第几层断层图像。
Start 从第几层开始重建
End 重建到第几层

Interval: 允许向计算机中一次导入多少层的断层数据进行同时重建

32位操作系统，4G内存，Interval<=10；64位系统，32G内存，Interval<=1000

DEIreconstructor的使用

输入信息判断

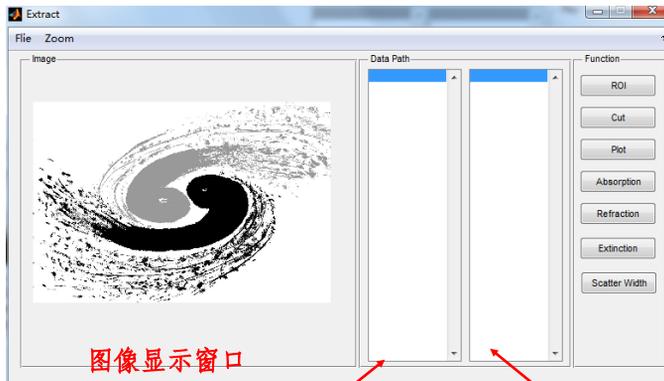


只有利用 CorrectAll 校正完数据后，才可最终重建



DEIreconstructor的使用

- 信息分离算法软件界面（点击主界面Extract）



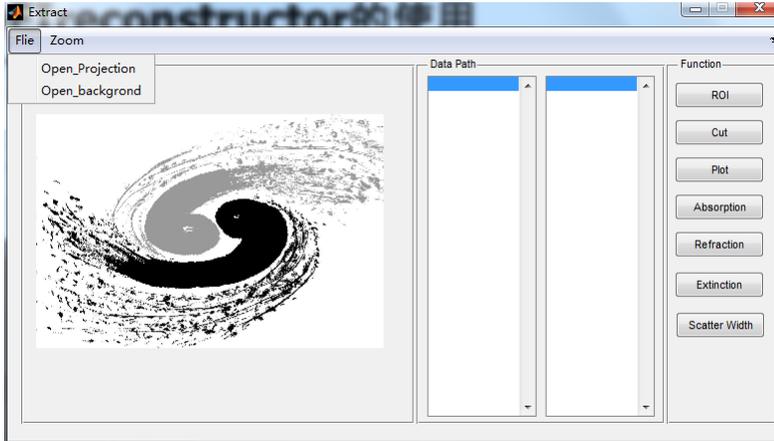
图像显示窗口

投影数据路径显示

背景数据路径显示

DEIreconstructor的使用

- 点击File 载入背景图像和投影图像

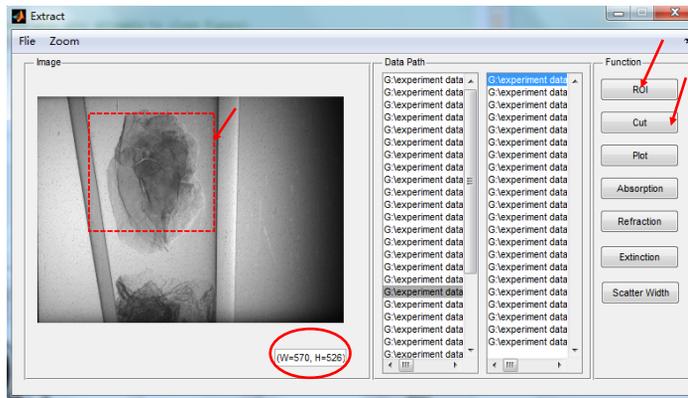


2013-11-27

51

DEIreconstructor的使用

- 投影图像尺寸大会造成计算速度降低，裁剪图像可以提高计算速度



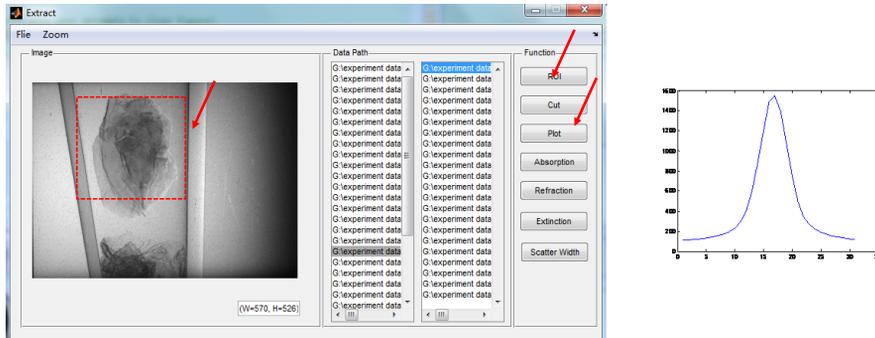
1. 点击ROI
2. 在图像上选取感兴趣区
3. 点击Cut按钮保存数据

2013-11-27

52

DEIreconstructor的使用

1. 点击ROI
2. 在图像上选取感兴趣区
3. 点击Plot按钮，可以画出该区域进行平均灰度后的摇摆曲线

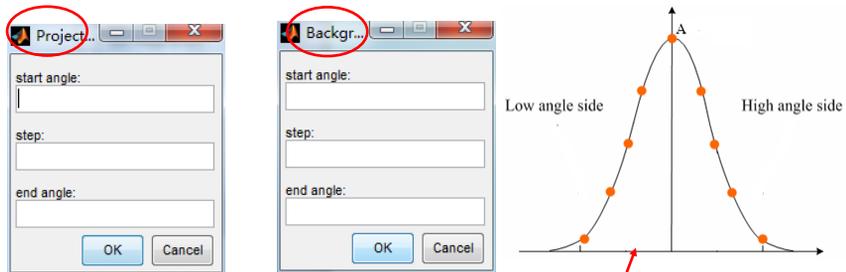


2013-11-27

53

DEIreconstructor的使用

- 点击Refraction按钮，会要求输入分析晶体的转动信息

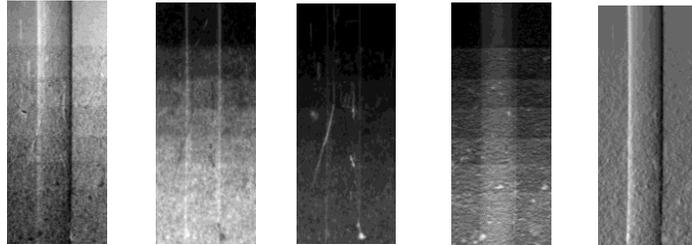


Start angle: 起始转动角度
End angle: 停止时角度
Step: 步长

2013-11-27

54

DEIreconstructor的使用

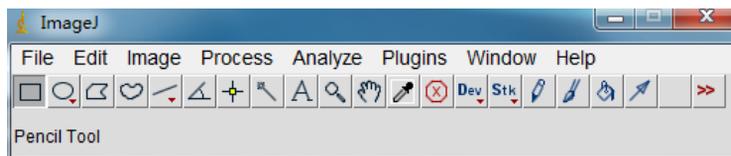


CT投影数据 消光信息 散射宽度信息 吸收信息 折射信息

DEIreconstructor: A software for diffraction enhanced imaging processing and tomography reconstruction,(2014) Chinese Physics C.

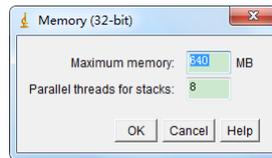
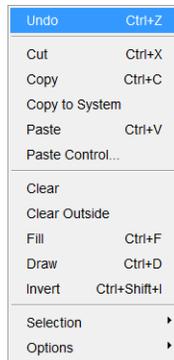
ImageJ 的使用

- **ImageJ has been written and is maintained by Wayne Rasband at the National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA**
- <http://imagej.nih.gov/ij/>



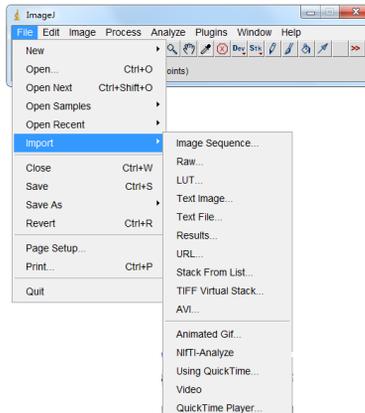
ImageJ 的使用-设置内存

- Under Edit>Options>Memory & Threads



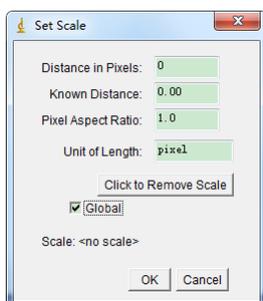
ImageJ 的使用-数据的导入

- 切片数据、图像数据、Raw数据
- File>import

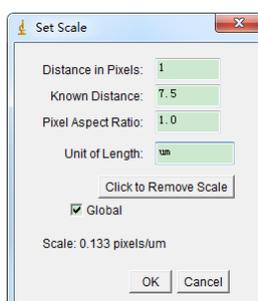


ImageJ 的使用-标尺的设置

- **Analyze>set scale**



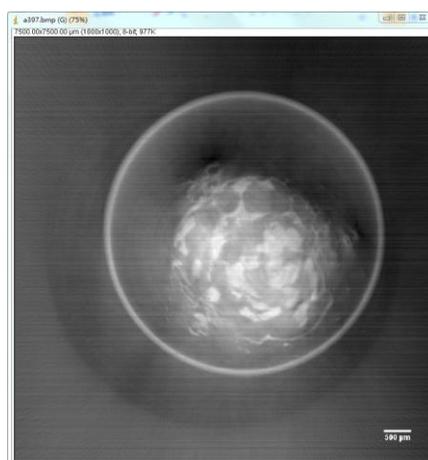
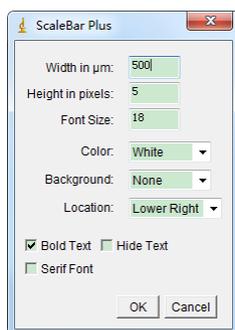
初始值



设置后

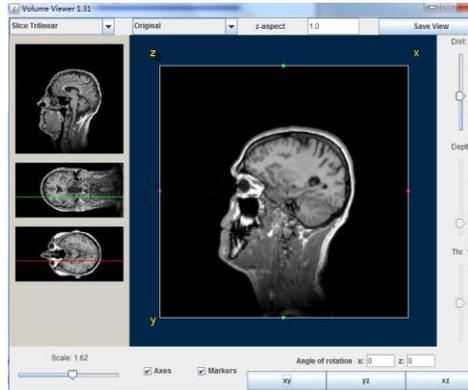
ImageJ 的使用-标尺的加载

- **Analyze>tool>scale bar**



ImageJ 的使用-三维可视化显示

- **Plugins>3D>volume Viewer**
- **Image>stacks>orthogonal views**

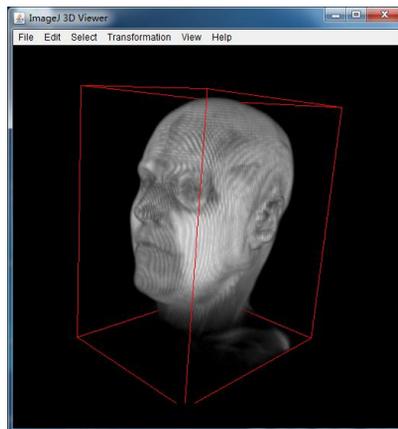


2013-11-27

61

ImageJ 的使用-三维可视化显示

- **Plugins>3D>imageJ 3D viewer**

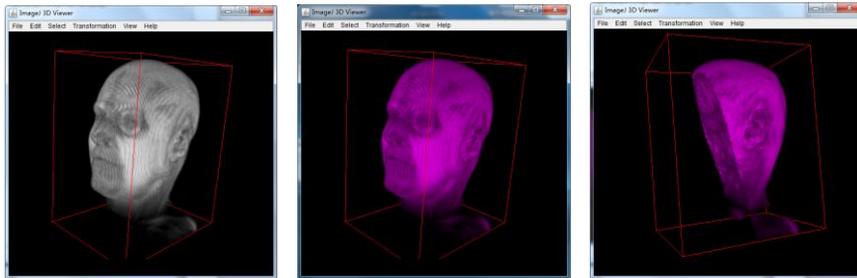


2013-11-27

62

ImageJ 的使用-三维视频制作

- 颜色、阈值的调整: `edit>attributes`
- 三维图像的裁剪: `edit>fill selection`
- 动画输出: `view>record 360deg rotation>save`



2013-11-27

63

ImageJ 的使用-其它工具箱的使用

- `Plot ,measure` 函数
- `Filter` 函数的使用
- 扣除背景
- 图像的运算 `+. -*.`

2013-11-27

64

谢谢!

Thanks for Your Time!