

# URA 编码孔径的层析成像

赵 宝 庆

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

## 提 要

URA 编码孔径成像是 X 射线成像的一项新技术。它不但提高了信噪比, 而且具有层析分辨能力。本文详细论述了 URA 编码孔径的层析成像原理, 并提供了一种改善层析成像质量的叠代方法。并应用迭代方法成功地进行了计算机模拟实验。

关键词: 编码孔径, 层析成像原理。

## 一、前 言

X 射线, 特别是高能 X 射线不能用普通光学系统成像, 通常采用小孔成像原理的单孔像机。但是单孔像机的通光量很小, 信噪比低。编码孔径成像是将单孔像机的针孔用按某种模式排列的多针孔来代替, 从而加大了光通量, 提高了信噪比。但由于多针孔成像, 记录图片由 X 光源的许多重迭像组成, 以致记录图片与光源的面貌全非。为此, 需要对记录图片应用计算机进行译码处理重构 X 光源像, 即编码孔径成像。对于编码孔径的排列可以采用不同的模式, 采用均匀冗余阵列(URA)的 URA 编码孔径, 它不仅具有增大光通量, 提高信噪比的特性, 而且具有一定的层析分辨能力。本文通过理论分析和计算机模拟实验, 清楚地证明了 URA 编码孔径的层析分辨能力, 即获得三维深度信息的能力。

## 二、URA 编码孔径的层析成像原理

编码孔径的记录图像可以看成是多个针孔成像的叠加, 也可以看成是许多孔径投影的叠加。目标光源可以看成是由许多点光源组成的, 每个点光源在记录面上产生一个编码孔径的投影, 那么记录图像就是由许多编码孔径的投影叠加而成的。每个投影的大小依赖于点到探测器的距离, 而投影的位置依赖于点的横向位置, 如图 1 所示, 距离探测器比较远的光点产生比较小的孔径投影, 而距离较近的会产生比较大的孔径投影, 也就是说记录图像上包含了目标的深度信息。由于距离不同, 或者说深度不同的光点产生的孔径投影尺寸不同, 因此, 对于同一张记录图像, 可以利用不同尺寸的译码图样, 重构不同深度的

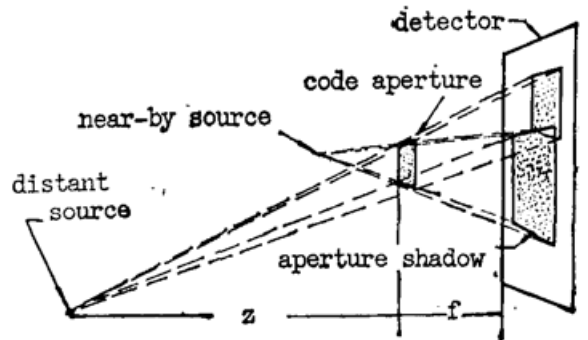


Fig. 1 The coded aperture for obtaining depth information

点光源分布的图像,也就是说可以重构不同层次的断面图像。

令到孔径面距离为  $z$  的平面上的 X 光源强度分布为  $O_z(x, y)$ , 而  $A_z(x, y)$  为编码孔径相对于距离  $z$  的适当放大的变型, 则记录图像  $P(x, y)$  为

$$P(x, y) = \sum_z [O_z(x, y) \star A_z(x, y)], \quad (1)$$

即记录图像是每个物面与适当放大的编码孔径的相关之和。式中  $\star$  为相关算符。参考几何关系, 距离孔径面为  $z$  的平面上的点光源所产生的孔径投影的放大系数  $M$  为

$$M = (z+f)/z, \quad (2)$$

式中  $f$  为孔径面到探测器的距离。为了从记录图像  $P(x, y)$  重构距离为  $z'$  的平面上的目标信息, 需要与适当放大的译码函数  $G_{z'}(x, y)$  相关, 其估计值为

$$\begin{aligned} \hat{O}_{z'}(x, y) &= P(x, y) \star G_{z'}(x, y) = \sum_z [O_z(x, y) \star A_z(x, y)] \star G_{z'}(x, y) \\ &= O_{z'}(x, y) + \sum_{z \neq z'} [O_z(x, y) \star A_z(x, y)] \star G_{z'}(x, y). \end{aligned} \quad (3)$$

显然 X 光源的所有平面都对  $z'$  平面的估计值有影响。仅仅距离为  $z'$  的平面在焦距位置上, 不产生伪像, 而其他距离的平面是离焦的, 必然对重构目标产生影响, 使重构图像模糊。本文采用的 URA 编码阵列为伪噪声阵列, 由于它的随机特性, 离焦面的影响所产生的伪像不会太显著<sup>[1]</sup>。

### 三、层析重构的迭代方法

为了减少离焦面的影响, 改善层析成像的质量, 采用叠代方法重构每个断面的光源分布图像<sup>[1]</sup>。

层析重构叠代方法的基本原理如下: (1) 对计算机第一次重构的图象进行编码, 组成新的编码图片。(2) 对原始编码图像与新编码图片之间的差别进行译码, 提出伪像。(3) 然后从第一次重构的图像中减去伪像, 就获得了新的重构图像。通过几次叠代循环可以期望得到比较好的层析图像。

假定目标由  $N$  层组成, 由(1)式可知编码图像为

$$P = \sum_{i=1}^N O_i \star A_i, \quad (4)$$

式中  $N$  是由目标尺寸和深度分辨率确定的, 而  $\{A_i\}$  之间仅仅是坐标比例上的变化。为了重构各层的目标信息, 其各层的译码函数  $\{G_i\}$  也要作相应的比例变化。假定要估计第  $k$  层的目标信息, 根据(3)式, 则初始的重构目标为

$$\hat{O}_k = P \star G_k = O_k + \sum_{i \neq k} O_i \star A_i \star G_k = O_k + g_k, \quad (5)$$

式中第二项  $g_k$  代表了离焦面对第  $k$  层目标的模糊影响, 即伪像。从而可得到一组各层的重构目标  $\{\hat{O}_i\}$ 。为了减少伪像  $\{g_i\}$  的影响, 通过计算机对  $\{\hat{O}_i\}$  再进行编码, 得到新的编码图像

$$P' = \sum_{i=1}^N \hat{O}_i \star A_i = \sum_{i=1}^N (O_i + g_i) \star A_i = P + \sum_{i=1}^N g_i \star A_i = P + R, \quad (6)$$

式中  $R$  是由各层伪像  $\{g_i\}$  编码而成的。显然从新的编码图像中减去原始的编码图像可以提出各层伪像的编码图像  $R$ , 即

$$P' - P = R = \sum_{i=1}^N g_i \star A_i \tag{7}$$

采用同样的译码过程,可求出各层伪像 $\{g_i\}$ 的估计值,即

$$\hat{g}_k = R \star G_k = g_k + \sum_{i \neq k} g_i \star A_i \star G_i = g_k + g'_k \tag{8}$$

式中第二项  $g'_k$  是伪像译码  $\hat{g}_k$  所带有的伪像。

从初始重构目标  $\hat{O}_k$  中减去伪像的估计值,可获得新的重构目标

$$O'_k = \hat{O}_k - \hat{g}_k = O_k - g'_k \tag{9}$$

根据编码孔径的随机特性,  $g'_k$  小于  $g_k$ , 因此新的重构目标减少了伪像的影响。从而, 重复进行上述步骤(6)~(9)式, 经过几次叠代循环就可满意地重构各层的目标信息。

### 四、实验结果

作者曾研制参加了 URA 编码孔径像机<sup>[3]</sup>, 采用的 URA 编码孔径为  $31 \times 33$  的  $m$  阵列, 如图 2 所示。其小孔为  $30 \mu\text{m}$  的方形小孔, 中心间隔为  $50 \mu\text{m}$ 。在真空靶室的拍摄实验中, 单孔象机由于光通量太小, 根本没有得到空心靶的软 X 射线图像。而 URA 编码孔径像机却得到了比较好的编码图像, 经计算机的译码重构, 得到了清晰的空心靶软 X 射线图像, 如图 3 所示。

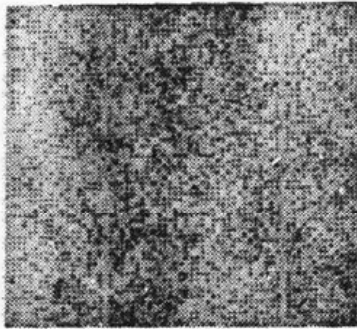


Fig. 2 An  $m$ -array coded aperture  $31 \times 33 \mu\text{m}$

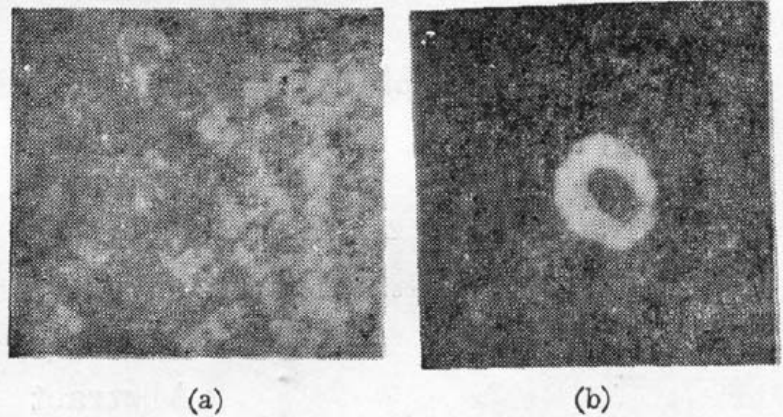
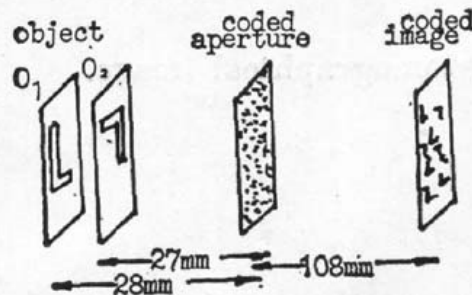


Fig. 3

(a) Coded image of actual hollow object;  
(b) Reconstructed object by computer processing

对于 URA 编码孔径的层析成像能力, 则应用叠代方法进行了计算机模拟实验。设目标由两层组成, 第一层目标为线粗两个像素的字母“L”, 另一层目标为字母“L”旋转  $180^\circ$ ,



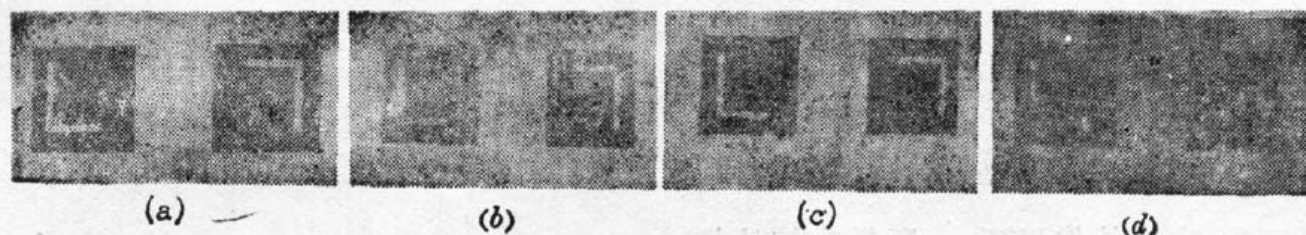


Fig. 5 The results by computer simulation with tomographic capabilities of URA coded aperture  
 (a) two spatially separated test objects;  
 (b)~(d) reconstructed image after the three iterative cycles

即“T”，其深度间隔为 1 mm。编码孔径层析成像的模拟实验装置如图 4 所示，其放大倍数为 4 倍。同样，采用上述的叠代方法，经过三次迭代，就得到了伪像比较少的两个层次的断面图像，重构图像结果如图 5 所示，图中左边为第一层的图像，右边为第二层的图像。

### 参 考 文 献

- [1] T. M. Cannon, E. E. Fenimore; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 7(Apr), 1052~1057.
- [2] N. Ohyama, T. Honda *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **36**, No. 6(Mar), 434~438.
- [3] 胡家陞, 董玉芝等;《光学学报》, 1989, **9**, No. 7(Jul), 623~628.

## Tomographical imaging of URA coded aperture

ZHAO BAOQING

(Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics Academia Sinica Changchun 130022)

(Received 16 October 1990; revised 19 February 1991)

### Abstract

The coded aperture imaging using URA pattern is a new technique for X-ray imaging. It can improve S/N, and has tomographic capability. In this paper, we describe the principle of tomographical imaging using URA coded aperture in detail, and provide a iterative method for improving tomographical imaging. The computer simulation using iterative method has been successfully performed.

**Key words:** coded aperture, tomographical image.