

文章编号: 0258-7025(2004)08-0947-04

光电成像中不同形状编码孔径的解码比较

程丽红^{1,2}, 田晓东¹, 谢 存¹

(¹ 大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116023; ² 大连海事大学数理系, 辽宁 大连 116024)

摘要 在 X 光成像中, 编码孔径成像是一种两步成像过程, 第一步是编码过程, 利用编码孔径收集目标的图像; 第二步是解码过程, 对编码图像进行滤波和重建, 以便获得高分辨率的可视目标像。而编码孔径主要有两种, 一种是根据各孔径的形状分类; 另一种是根据各子孔径在孔径平面的空间分布分类。解码过程中用的方法是维纳 (Wiener) 滤波。维纳滤波算法能够以很低的计算代价获得较好的复原效果。在简述孔径编码成像技术的原理和发展的基础上, 提出在光电成像中利用编码孔径成像及图像恢复处理方法。对不同形状孔径进行编码解码处理, 通过比较选择出最佳的孔径形状。并通过实验表明, 利用该编码孔径成像可以在保证高分辨率的情况下, 具有较高的集光效率和信噪比, 成像效果很好。

关键词 图像处理; 图像编码及解码技术; 编码孔径; 维纳滤波

中图分类号 O 438 文献标识码 A

Recoded Contrast of Difform Coded Aperture in Photoelectricity Imaging

CHENG Li-hong^{1,2}, TIAN Xiao-dong¹, XIE Cun¹

(¹ School of Electronic & Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116023, China)
(² Department of Mathematics and Physics, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract In X-ray imaging technology, coded imaging is a process of two steps. The first step is coding process, in which the information of object is collected using coded aperture. The second step is decoded process, in which the coded image is filtered and reconstructed in order to obtain a visible object image with high resolution. There are two kinds of coded aperture, one according to the shape of apertures and the other according to the space position of aperture plane. Wiener filtering is used in the decoded process, because it can obtain better reconstruction results with lower calculated cost. A method of coded imaging using ring-coded aperture and its image restoration technique are presented, the development of coded aperture imaging technologies is described. Difform aperture is adopted in coded and recoded process, compared with each other optimal aperture is chosen. As experiments prove, using this aperture, good imaging result can be gained and restored, because this method combines all of high resolution-capability, large radiation collection efficiency, and high signal-to-noise ratio.

Key words image processing; coded and decoded image technology; coded aperture; Wiener filter

1 引 言

编码孔径成像是光电成像技术的重要方法之一, 它主要是通过编码孔径来改变光瞳函数, 进而改善成像系统的传递函数, 实现一定方式的像元组合的技术。20 世纪 50 年代中期, 法国人马尔夏首先

采用改变光瞳函数的方法来改善光学系统的传递函数, 从而实现提高光学系统成像质量的目的。改变光瞳函数实际上就是对光瞳函数进行编码。20 世纪 60 年代, 顾德门对成像中的编码技术进行了较深入的研究。E. E. Fenimore 等^[1], C. Yamanaka^[2] 等从理论和实践上发展了编码孔径成像技术。随着

收稿日期: 2003-03-11; 收到修改稿日期: 2003-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 19874010)资助项目。

作者简介: 程丽红(1968—), 女(满族), 大连海事大学数理系副教授, 现为大连理工大学在读博士生, 主要从事光学工程和图像处理方面的研究。E-mail: cheng-lihong@126.com

激光聚变、等离子体物理^[3],特别是惯性约束聚变(ICF)的发展,X光成像成为诊断上述过程的必不可少的手段。由于找不到适用于X射线成像的透射材料,再加上介质在X射线区域的折射率略小于1,因此编码孔径成像在X射线区域中得到了广泛应用^[4~7]。

编码孔径成像具有较大的视场,且一个点目标经编码孔径后对整个接收平面均有作用。因此,编码孔径成像技术对噪声干扰不十分敏感,应用该技术可得到较高的成像信噪比和集光效率。目前,编码孔径主要有两种,一种是根据各孔径的形状分类,主要有圆环孔、方环孔、三角环孔、多角环孔等;另一种是根据各子孔径在孔径平面的空间分布分类,主要有随机阵列,非冗余阵列(NRA),均匀冗余阵列

(URA)^[4,8]等;还有一种透过率是渐变的,称之为切趾法。本文以孔径形状分类为例讨论编码成像和图像恢复过程,并进行了对比。

2 编码成像方法

编码成像过程中,编码孔径成像技术是利用光的直线传播特性,入射光经孔径编码后直接投影在接收平面上,每个物点在接收平面上形成一个编码孔径的投影图像。不同物点产生的像因相互错开、叠加而在接收平面上形成了退化的、重叠的二维分布信号,即编码像。以圆环编码孔径为例,其成像原理如图1所示,其中,(a)用环形编码孔径获得重叠像,(b)表现了环孔大小与环孔宽度和直径的关系。

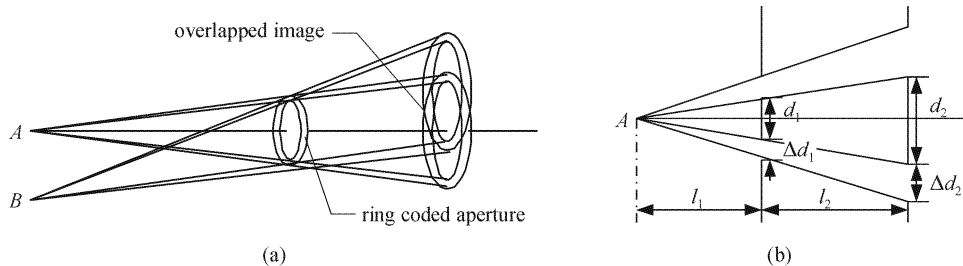


图1 环形编码孔径成像原理图

Fig. 1 Imaging principle of ring coded aperture

由图1(a)可知,靶标上每一点经过环孔后在屏幕上形成一个投影像,它实际上是一个放大的环孔。图中画出靶标中的两个点A和B所成的像,这些放大的环孔大小与环孔宽度和直径的关系如图1(b)所示,即

$$d_2 = \frac{l_1 + l_2}{l_1} d_1, \quad \Delta d_2 = \frac{l_1 + l_2}{l_1} \Delta d_1 \quad (1)$$

设靶标函数为 $o(x, y)$, $h(x, y)$ 为环形编码孔径系统的点扩散函数, $n(x, y)$ 为系统的无关噪音函数,则编码孔径相机所形成的像函数 $i(x, y)$ 为

$$i(x, y) = o(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (2)$$

式中 $*$ 为卷积符号,对上式进行傅里叶变换,可得到频谱分布为

$$I(u, v) = O(u, v)H(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

式中 $H(u, v)$ 为环形编码孔径相机的调制传递函数。

3 图像恢复解码方法

为了得到目标真实的空间(二维或三维)分布,需要对接收平面上得到的编码图像进行必要的解码

处理,即需要利用光学或数字图像处理技术对编码图像进行恢复和重构。其任务就是从已知的编码图像中,根据系统的传递函数、噪声等某些先验知识和信息,对真实目标作出最佳估值。本文采用的主要图像恢复方法是:利用数字图像处理技术在对编码图像进行去噪后,应用维纳(Wiener)滤波器进行图像解码,从而得到恢复后的图像。

维纳滤波就是寻找传输函数为 $H_w(u, v)$ 的滤波器,使得恢复出的目标估值 $o'(x, y)$ 与真实 $o(x, y)$ 的均方误差最小,即

$$E\{[o(x, y) - o'(x, y)]^2\} = \min \quad (4)$$

则

$$H_w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + s_n(u, v)/s_o(u, v)} \quad (5)$$

式中, $H^*(u, v)$ 为编码孔径成像系统的传递函数的复数共轭, $s_o(u, v)$, $s_n(u, v)$ 分别为靶标图像和噪声的功率谱密度,则恢复的靶标估值为

$$O'(u, v) = H_w(u, v) \cdot I(u, v) = \frac{H^*(u, v) \cdot I(u, v)}{|H(u, v)|^2 + s_n(u, v)/s_o(u, v)} \quad (6)$$

在很多情况下, $s_o(u, v)$ 和 $s_n(u, v)$ 是未知的。为了计算方便, 可根据处理对象的不同将 $s_n(u, v)/s_o(u, v)$ 设为某个经验值 ϵ , 即

$$H_w(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \epsilon} \quad (7)$$

$$O'(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \epsilon} \cdot I(u, v) \approx O(u, v) + N'(u, v) \quad (8)$$

对(8)式作逆傅里叶变换 (IFFT), 则得到重构后的靶标像为

$$O'(x, y) \approx o(x, y) + n'(x, y) \quad (9)$$

由(9)式可以看到, 经过维纳滤波器滤波后, 就可以近似重构出原目标的图像。 $n'(x, y)$ 为噪音, 它的存在会使图像的对比度有所降低。

图像恢复过程是用计算机进行的。首先模拟孔径编码成像的重叠像; 利用快速傅里叶变换 (FFT) 得到该重叠像的频谱分布; 利用投影法得到编码孔径成像系统的点扩散函数, 经过傅里叶变换后得到该系统的调制传递函数 $H(u, v)$, 利用调制传递函

数来设计维纳滤波器。设计的关键问题是选择合适的 ϵ , 使处理的结果尽可能趋于最佳。最后利用维纳滤波函数对得到的重叠像的频谱分布进行滤波处理, 再通过逆傅里叶变换进而得到重构像。

4 实验及结果比较

为了直观方便地验证编码孔径成像方法的理论正确性, 估算成像系统的成像质量, 分别利用不同形状的编码孔径进行了计算机模拟成像, 得到相应的编码图像; 同时, 应用编制的图像处理软件对不同形状的编码图像进行了恢复处理, 通过比较选择出最佳的孔径形状。并用此孔径进行了实际光学成像实验。

在计算机模拟成像实验中, 利用计算机分别生成三角环 ($n=3$) 外边长 250 像素, 环宽 10 像素, 四角环 ($n=4$) 外边长 250 像素, 环宽 10 像素, 六角环 ($n=6$) 外边长 125 像素, 环宽 10 像素, 八角环 ($n=8$) 外边长 96 像素, 环宽 10 像素, 圆环 ($n=\infty$) 外环直径 250 像素, 环宽 10 像素的不同环形孔径,

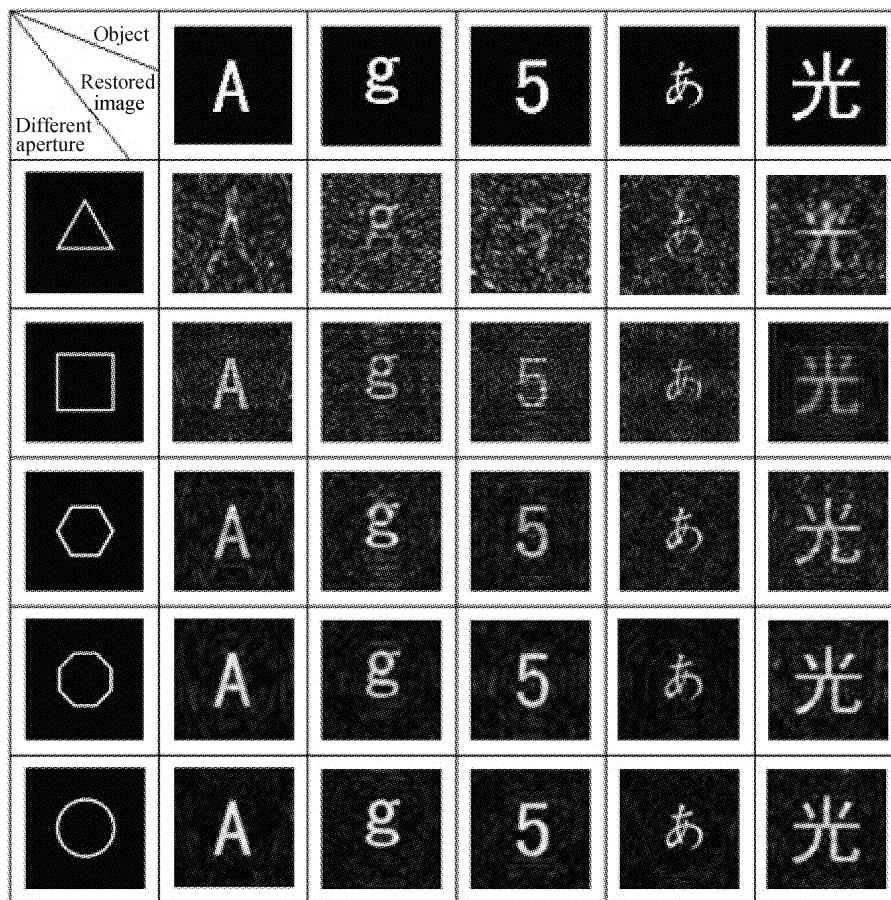


图 2 计算机模拟实验结果

Fig. 2 Simulated imaging/restoration experiment in computer

见图 2,原目标分别为图 2 所示的“A,g,5,あ,光”等不同字符和汉字。不同环孔恢复后的图像见图 2。

通过比较可以看出不同形状的环形孔径 n 越大,处理后的恢复图像(即解码图像)越好。因此在实际实验中选择了圆环形($n = \infty$)编码孔径进行光学成像实验。

在实际光学实验中,制作外环直径 100 mm,环宽 2 mm 的环形孔径,利用 CCD 相机摄取编码图像。整个实验在暗室中进行,实验光路如图 3 所示。其中,目标与孔径板的间距 l_1 为 15 cm,孔径板与成像屏的间距 l_2 为 150 cm。实验中以字母 F 作目标,模拟实验结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,利用环形孔径编码成像方案可行,而且圆环形孔径重构效果最好。

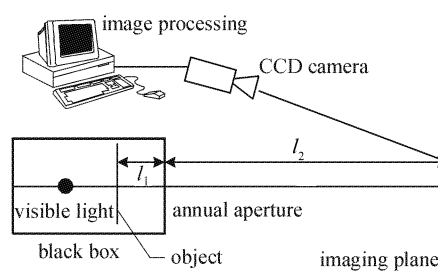


图 3 可见光实验装置示意图

Fig. 3 Equipment of visible light experiment

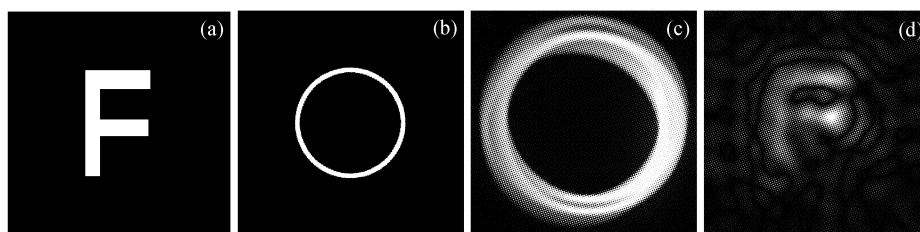


图 4 可见光模拟实验结果

(a) 物体;(b) 环形孔;(c) 重叠像;(d) 再现图像

Fig. 4 Simulated imaging/restoration experiment in visible light

(a) object; (b) aperture; (c) overlapped image; (d) restored image

5 结 论

提出了光电成像技术中一种利用编码孔径成像和解码的方法。同时对不同形状的孔径进行了比较,选择出了最佳的孔径形状。并通过实验验证,利用该编码孔径成像可以在保证高分辨率的情况下,具有较高的集光效率和信噪比,成像效果很好。目前,正在把该项技术应用于激光约束聚变的过程诊断。

致谢 本课题的研究和有关设备的制备得到了中国工程物理研究院高温高密度等离子体国家重点实验室郑志坚研究员、刘宗礼研究员、成金秀副研究员、缪文勇副研究员的大力支持和协助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 E. E. Fenimore, T. M. Cannon. Uniformly redundant arrays; digital reconstruction methods [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(10): 1858~1864
- 2 C. Yamanaka, M. Yamanaka, H. Niki *et al.*. A URA coded aperture camera for the inertial confinement fusion experiments [J]. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 1984, **31**(1):490~494

- 3 Zhang Changxue, Cheng Jing, Han Shensheng *et al.*. Simulative research of holographic microscopy based on laser-plasma soft X-ray source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):164~168
张长学,程 静,韩申生等. 基于激光等离子体 X 光源的软 X 射线全息显微成像实验的模拟研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2): 164~168
- 4 Hu Jiasheng, Dong Yuzhi, Zhao Baoqing *et al.*. The imagine and processing technique of X-ray coded aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(7):623~629
胡家升,董已芝,赵宝庆等. X 光编码孔径成像和处理技术[J]. *光学学报*, 1989, **9**(7):623~629
- 5 D. Ress, D. R. Ciarlo, J. E. Stewart *et al.*. A ring coded-aperture microscope for high-resolution imaging of high-energy X-rays [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10):5086~5088
- 6 Jiang Shaoen, Zheng Zhijian, Sun Kexu *et al.*. X-ray emission form double disk targetsiang [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12):1428~1431
江少恩,郑志坚,孙可煦等. 双盘靶 X 光辐射的实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12):1428~1431
- 7 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):110~114
孙 萍,谢敬辉,周元林. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1):110~114
- 8 E. E. Fenimore, T. M. Cannon. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3):337~347