

相干光学系统的计算机模拟

高 隽 王 浩 陆 阳 张 景 元

(合肥工业大学计算机与信息系 合肥 230009)

提要 在衍射理论基础上,通过对衍射公式以及光波通过透镜后所引起的相位变化的讨论,提出了利用 FFT 模拟光学系统的计算机算法,并给出了模拟结果。

关键词 FFT, 衍射, 相干光学, 计算机模拟

1 引 言

光学与光电子学是近年来发展迅速的学科之一,光波作为信息的载体,具有容量大、频带宽、传播速度快等优点,因而对光子信号的产生、获取、调制、传播、处理、探测及显示等方面的研究具有很强的应用背景。作者于 1995 至 1996 年在德国斯图加特大学网络与系统理论研究所从事了“光电形状识别系统”的研究与开发工作。在研究工作中研究了相干光学系统的计算机模拟算法,该算法可对任意的二维图像经过相干光学系统成像进行模拟,解决了目前模拟算法只能对一维信号及二维 δ 函数进行模拟的问题,这对相干光学系统的设计有重要的意义。

2 衍射理论基础

衍射规律是光传播的基本规律。基尔霍夫在 1882 年得到的衍射公式是解决衍射问题的基础,它是把光波作为标量波的一个近似理论。当波长为 λ 的光束在空间传播距离为 z 时,此过程可等效为一个自由传播系统,根据系统理论观点,该系统是一个线性空不变系统,该系统传递函数 $H(f_x, f_y)$ 可表示为^[1]基尔霍夫衍射:

$$H(f_x, f_y) = \begin{cases} \exp[-j2\pi z/\lambda \cdot \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}] & \text{当 } f_x^2 + f_y^2 < 1/\lambda^2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

当公式(1)中 $f_x^2 + f_y^2 \ll 1/\lambda^2$ 时,为菲涅耳衍射:

$$H(f_x, f_y) = \exp[-j2\pi z/\lambda] \cdot \exp[j\pi z\lambda(f_x^2 + f_y^2)] \quad (2)$$

另外,用 $t(x, y)$ 来表示薄透镜对光相位的延迟作用,在近轴条件下有

$$t(x, y) = \exp[-jk/(2f) \cdot (x^2 + y^2)] \quad (3)$$

这是球面形薄透镜对光振动所起的相位变换,它是由透镜本身性质决定的,与入射光振动复振幅的具体形式无关。

同样对于圆柱面形透镜有

$$t(x, y) = \exp[-jk/(2f) \cdot x^2] \quad (4)$$

3 计算机模拟算法

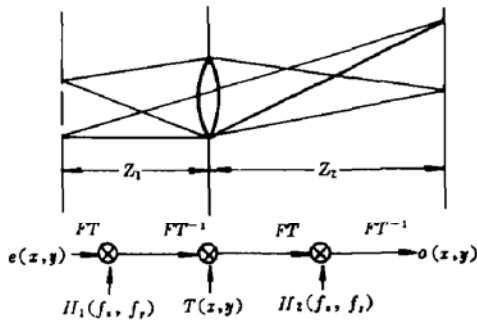


图 1 模拟算法示意图

Fig. 1 The scheme of the simulation algorithm

通过上述对光波的传播以及薄透镜对光振动相位变换的讨论,考虑到衍射公式在频域中的表示,可得到计算机模拟算法。下面以图 1 所示由单透镜所构成的相干光学系统为例进行说明:

① $e(x, y)$ 为二维灰度值图像,先对其进行 2D FFT 得到频谱函数为 $E(f_x, f_y)$;

② 按公式(1)或(2)求系统传递函数 $H_1(f_x, f_y)$;

③ 透镜 L 前的频谱分布 $U_1(f_x, f_y) = H_1(f_x, f_y) \cdot E(f_x, f_y)$;

④ 求 $U_1(f_x, f_y)$ 的 2D 傅里叶逆变换得 $u_1(x, y)$;

⑤ 将 $u_1(x, y)$ 与透镜函数 $t(x, y)$ 相乘可得透镜后光振动的复振幅 $u_2(x, y)$

$$u_2(x, y) = u_1(x, y) \cdot t(x, y)$$

⑥ 再次使用 FFT 求 $u_2(x, y)$ 的频谱函数 $U_2(f_x, f_y)$;

⑦ 按公式(1)和(2)求系统传递函数 $H_2(f_x, f_y)$;

⑧ $U_2(f_x, f_y)$ 与 $H_2(f_x, f_y)$ 相乘可得观察屏上(或输出)的频谱分布

$$O(f_x, f_y) = U_2(f_x, f_y) H_2(f_x, f_y)$$

⑨ 求 $O(f_x, f_y)$ 的傅里叶逆变换 FFT^{-1} 可输出图像 $o(x, y)$

对于有多个透镜的情形,可重复以上步骤,若考虑孔径函数或光圈的作用也可按以上思路及步骤进行。

设输入图像 $e(i, j)$ 为 $N \times N$, 即 $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。对公式(1)中的相位进行离散计算有

$$\begin{aligned} \psi &= -2\pi z/\lambda \cdot \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} = \\ &= -2\pi \sqrt{(z/\lambda)^2 - z^2[(i/x_{\max})^2 + (j/x_{\max})^2]} = \\ &= -2\pi \sqrt{(z/\lambda)^2 - (z/x_{\max})^2[(i + 1/2)^2 + (j + 1/2)^2]} = \\ &= -\sqrt{(2\pi z/\lambda)^2 - (2\pi z/x_{\max})^2(i^2 + i + j^2 + j + 1/2)} \end{aligned}$$

其中 x_{\max} 为奈奎斯特频率

$$x_{\max} \geq N/2 \cdot \lambda$$

若 $N = 1024, \lambda = 0.5 \mu\text{m}$, 则 $x_{\max} \geq 256 \mu\text{m}$ 。

总之,在进行计算机模拟时要考虑到像素单位的换算问题,对于图像采样频率的取值,要满足奈奎斯特频率。该算法可对由任意薄透镜组成的相干光学系统进行计算,对于任意的二维输入图像都可通过该模拟算法得到相干光学系统的输出图像。使用该算法还可以观测相干光学系统任一透镜、光圈等光学元件前和后的光振动复振幅及相位分布情况,这对于相干光学系统的仿真及设计有着重要的意义。

4 模拟结果

上述计算机模拟算法,我们在 PC586 上,以 Linux 为操作系统,在 KHOROS 环境下编程实现。下面给出两个典型的模拟结果。

4.1 模拟傅里叶透镜

对于图 2 由单透镜组成的傅里叶光学系统模拟结果如图 3 所示。其中 (a) 为输入图像, (b) 为模拟输出图像,可见 (b) 正是 (a) 的频谱分布。

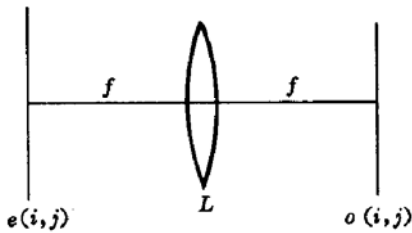


图 2 傅里叶透镜示意图

Fig. 2 Illustration of the Fourier lens

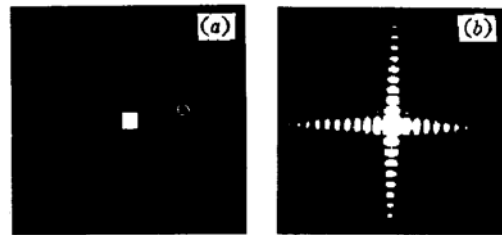


图 3 模拟结果 1

Fig. 3 The simulation results 1

(a) input image; (b) output image

4.2 模拟 Hough 物镜

Hough 变换是图像识别及计算机断层扫描(CT)中常用的变换,特别适用于边缘的识别,而且该变换对噪声不敏感,且易于并行实现,但该变换具有很大的计算量,在研究工作中我们设计及实现了节省的、短的 Hough 物镜^[2],如图 4 所示。

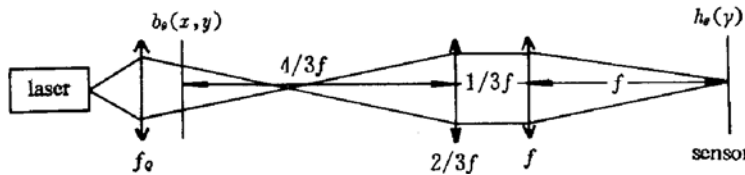


图 4 相干光学系统实现 Hough 变换

Fig. 4 The coherent optical system realized Hough transform

对于图 4 所示的由二个球面形透镜、一个圆柱面形透镜组成的实际相干光学系统,我们在进行该系统设计时,采用了本文提出的计算机模拟算法,对该系统进行了模拟,所得模拟结果如图 5 所示。

其中左图为输入图像,中图为实际 Hough 物镜的输出图像,右图为模拟输出图像,可见模拟输出图像完成了 Hough 变换并与实际 Hough 物镜的输出图像非常接近,至于两者之间的差异,这正反映了实现光学系统存在的像差。

总之,随着目前微机计算速度及存贮量的大大提高,在研究衍射频域特性的基础上,所实现的计算机模拟相干光学系统的算法,有其实用价值,对于相干光学系统的设计以及像差分析有着重要的意义。

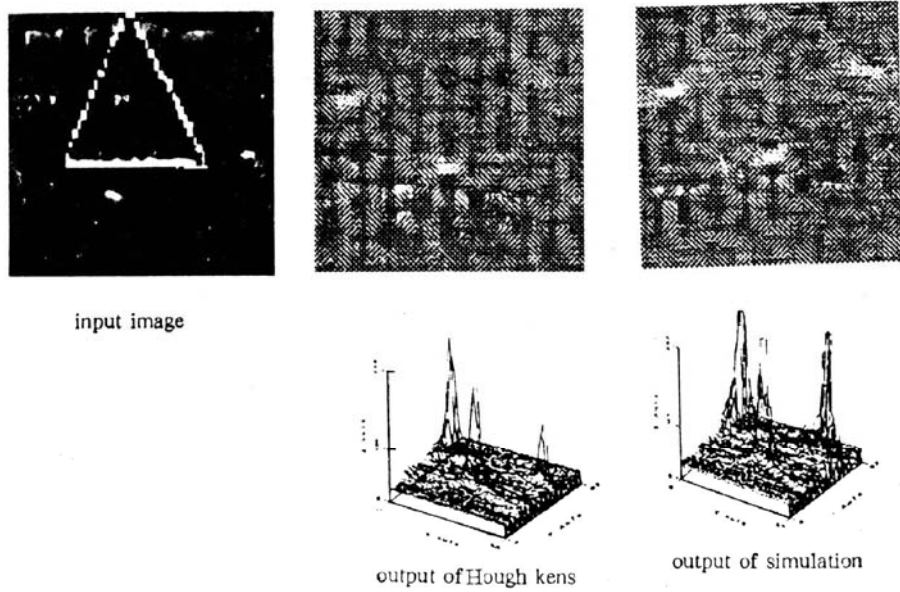


图 5 模拟结果 2

Fig. 5 The simulation results II

参 考 文 献

- 1 黄婉云. 傅里叶光学教程. 北京: 北京师范大学出版社, 1985
- 2 Ott P.. Compact optical processor for Hough and frequency domain in features. *SPIE Proc.*, 2848, SPIE Conf. on Material, Devices, and System for Optoelectronic Processing, Denver, USA, 1996

The Computer Simulation of the Coherent Optics System

Gao Jun Wang Hao Lu Yang Zhang Jingyuan

(Department of Computer Science and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract Based on diffraction theory, this paper discusses the diffraction formulas and the phase change brought about by the light which passes through a lens. A computer algorithm that uses FFT to simulate the optics system is presented, and the results of the simulation are given. It would be important for design of coherent optical systems.

Key words FFT, diffraction, coherent optics, computer simulation