

文章编号: 1001-3806(2008)01-0061-03

计算全息技术在光学相关识别中的应用

盛兆玄, 孙新利*

(第二炮兵工程学院 103 教研室, 西安 710025)

摘要: 为了实现光相关匹配滤波系统的小型化、集成化, 采用纯计算全息技术, 构建了一个光学相关识别系统。理论分析和实验验证表明, 用计算全息透镜代替傅里叶透镜制得的复数滤波器, 集成了 $4f$ 系统中第 2 个傅里叶变换透镜的作用, 滤波器后面不再用傅里叶透镜。这样减少了光学元件, 同时缩短了光路。结果表明, 该系统和 $4f$ 光学相关识别系统一样, 能够进行相关识别且具有平移不变性。

关键词: 全息; 相关识别; 二次相位因子; 复数滤波器

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A

Application of computer generated hologram technology in optical correlation recognition system

SHENG Zhao-xuan, SUN Xin-li

(103 Teaching and Researching Laboratory, the Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to realize the miniaturization and integration of the optical correlation recognition system, an optical correlation recognition system was proposed with the help of computer generated hologram (CGH). Theory analysis and experimental results show that complex filter made of CGH instead of Fourier lens, integrates the second Fourier lens in the $4f$ system. So there is no need of Fourier lens behind the complex filter. The system has reduced the optics component, simplified optical section at the same time. It also has the character of shift invariability as $4f$ optical correlation recognition system and can be used as optical correlation recognition system.

Key words: holography; correlation recognition; quadratic phase term; complex filter

引 言

光学相关识别是光学模式识别中近年来最活跃的一个研究领域, 主要是因为光学相关识别方法可以将光学理论与计算机科学技术结合起来, 集成了光学的高速并行处理和计算机准确灵活的数字处理等优点。光学相关识别系统一般是两个傅里叶变换透镜组成的 $4f$ 系统实现, 由于傅里叶透镜制作工艺要求高, 价格昂贵, 尤其大相对孔径的傅里叶透镜制作难度大^[1-2], 一般不易获得, 况且 $4f$ 滤波系统用到的光学元件多, 光路长, 难以满足光学相关识别系统向小型化、集成化发展的要求^[3-5]。最近有研究人员^[6]用光学全息法制取全息透镜来代替傅里叶透镜, 用会聚光作为参考光制作复数滤波器, 以缩减光路。但是, 用光学方法制作的全息透镜衍射效率低, 而且在相关面上出现零频项

和卷积项不易分离, 影响观察效果; 另一方面, 用光学全息法制作透镜和复数滤波器相干光路复杂, 而且曝光环境要求高, 制作麻烦。

计算全息技术 (computer generated hologram, CGH) 理论上可以再现任意波前, 只要将所需光波的数学描述输入计算机, 计算编码, 然后由计算机控制打印机或绘图仪输出, 再缩拍, 就可以制作出任意的透镜或复数滤波器。在制作复数滤波器时, 在所需的被识别目标频谱面上人为的引入一个二次项因子, 使制得的复数滤波器同时具有自聚焦功能, 这样便省去了一个傅里叶变换透镜, 缩短了光路。使光学相关识别系统简化, 适于光学相关识别系统的小型化、结构简单化。而且计算全息图大多是二元的, 衍射效率高, 抗干扰能力强, 噪音小, 易于复制^[7-8]。理论推导和实验结果证明, 该系统和 $4f$ 系统一样, 具有平移不变性, 可以用于光学相关识别系统。因此, 应用计算全息设计光相关识别系统, 具有广阔的应用前景^[9]。

1 用二元计算全息干涉图代替傅里叶透镜

因为傅里叶透镜的位相调制函数为 $t(x, y) =$

作者简介: 盛兆玄 (1979-), 男, 博士研究生, 从事弹药与导弹战斗部工程、光电信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: s_xin1@sina.com.cn

收稿日期: 2006-10-27; 收到修改稿日期: 2007-01-18

$\exp\left[-jk\frac{x^2+y^2}{2f}\right]$,所以由计算全息法制得的透镜的二元全息函数形式为:

$$h(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin[m \arcsin(1)]}{\pi m} \times \exp\{jm[2\pi x/T - k(x^2 + y^2)/(2f)]\} \quad (1)$$

式中, $\frac{1}{T}$ 是载波的频率, k 是波矢, m 是透镜焦距。设物体的透过率为 $g(x_0, y_0)$,用单位振幅平行光照射,紧靠物体后面的光场可以表示为: $u_0 = g(x_0, y_0)$,由角谱理论^[6],略去常数相位因子,光波到达透镜前面的光场为:

$$\mathbf{F}\{u_1\} = \mathbf{F}\{u_0\} \exp[-j\pi\lambda f(g_x^2 + g_y^2)] \quad (2)$$

式中, \mathbf{F} 表示傅里叶变换, $g_x = \frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}$, $g_y = \frac{y_f}{\lambda f}$ 。在紧靠计算全息透镜后面光场为:

$$u_2(x, y) = u_1 h(x, y) = u_1 \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin[m \arcsin(1)]}{\pi m} \times \exp\{jm[2\pi x/T - k(x^2 + y^2)/(2f)]\} \quad (3)$$

由于其它各级衍射效率很低,这里不予考虑,只考虑正负一级衍射。当 $m=1$ 或 -1 时:

$$u_2(x, y) = u_1 \exp\left[-jk\frac{x^2+y^2}{2f}\right] \frac{1}{\pi} \exp(j2\pi x/T) \quad (4)$$

由菲涅耳衍射理论^[6],略去常数相位因子,在计算全息透镜后一倍焦距 f 处的光场为:

$$u_3(x_f, y_f) = \frac{1}{j\lambda f} \exp\left[j\frac{k}{2f}(x_f^2 + y_f^2)\right] \mathbf{F}\left\{u_2 \exp\left[jk\frac{x^2+y^2}{2f}\right]\right\} = \frac{1}{j\lambda f\pi} \exp\left[j\frac{k}{2f}(x_f^2 + y_f^2)\right] \mathbf{F}\{u_1 \exp(j2\pi x/T)\} \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式得:

$$u_3(x_f, y_f) = \frac{1}{j\lambda f\pi} \exp[-j\pi\lambda f(g_x^2 + g_y^2)] \times \mathbf{F}\{u_0\} \exp\left[j\frac{k}{2f}(x_f^2 + y_f^2)\right] = \frac{1}{j\lambda f\pi} \times \exp\left[-j\pi\lambda f\frac{1}{T^2}\right] \exp\left[j2\pi\frac{x_f}{T}\right] \mathbf{F}\{g(x_0, y_0)\} \quad (6)$$

从上式可以看出,在计算全息透镜后一倍焦距 f 处光场分布正比于物体的傅里叶变换,此面也可认为是透镜的后焦面,二元计算全息透镜的一级衍射项就可完全实现物体的傅里叶变换。 $\exp\left[-j\pi\lambda f\frac{1}{T^2}\right]$ 是常量相位因子,可略去。 $\exp\left[j2\pi\frac{x_f}{T}\right]$ 是线性相移因子,从(4)式可以得到,计算全息透镜的一级衍射效率为: $\left[\frac{1}{\pi}\right]^2 \approx 10\%$,而振幅型正弦全息透镜的最佳衍射效率只有 6.25% ^[10],所以这种透镜的一级衍射效率比用光学全

息法制的振幅型正弦全息透镜的衍射效率高。

2 用迂回位相法制作复数滤波器

将物体的数学描述 $g(x, y)$ 输入微机,经抽样,调用快速傅里叶变换算法程序得到物体的频谱 $F(g_x, g_y)$,然后取复共轭得到 $F^*(g_x, g_y)$,由于傅里叶变换透镜的作用可以看作引入了一个二次项因子,所以,在 $F(g_x, g_y)$ 的后面人为的引入一个二次项因子得:

$$F' = F^*(g_x, g_y) \exp\left[-j\frac{k}{2z}(x_f^2 + y_f^2)\right] \quad (7)$$

采用迂回位相编码法,对(7)式进行编码,由计算机控制打印机,输出图像,然后进行缩拍得到复数滤波器。匹配滤波器的复振幅透过率正比于 F' ,所以透过滤波器的光场为:

$$u_4(x_f, y_f) = u_3 \cdot F' \quad (8)$$

将(6)式、(7)式代入(8)式,略去常数相位因子得:

$$u_4(x_f, y_f) = \frac{1}{j\lambda f\pi} F\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] \times F^*(g_x, g_y) \exp\left[-j\frac{k}{2z}(x_f^2 + y_f^2)\right] = \frac{1}{j\lambda f\pi} \times \exp\left[j2\pi\frac{x_f}{T}\right] F\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] \times F^*(g_x, g_y) \exp\left[-j\frac{k}{2z}(x_f^2 + y_f^2)\right] \quad (9)$$

由菲涅耳衍射理论,略去常数相位因子,在匹配滤波器的后面距离 z 处的光场为:

$$u_5(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x_2^2 + y_2^2)\right] \times \mathbf{F}\left\{u_4 \exp\left[j\frac{k}{2z}(x_f^2 + y_f^2)\right]\right\} \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式:

$$u_5(x_2, y_2) = \frac{-1}{\lambda^2 z f \pi} \exp(jkz) \exp\left[j\frac{k}{2z}(x_2^2 + y_2^2)\right] \times \mathbf{F}\left\{\exp\left[j2\pi\frac{x_f}{T}\right] F\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] F^*\left[\frac{x_f}{\lambda f}, \frac{y_f}{\lambda f}\right]\right\} = -\frac{1}{\lambda^2 z f \pi} \exp\left[jk\left[\frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right]\right] \mathbf{F}\left\{\exp\left[j2\pi\frac{x_f}{T}\right]\right\} * \mathbf{F}\left\{F\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] F^*(g_x, g_y)\right\} = -\frac{1}{\lambda^2 z f \pi} \times \exp\left\{jk\left[\frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right]\right\} \delta\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] * \mathbf{F}\left\{F\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] \times F^*\left[\frac{x_f}{\lambda f}, \frac{y_f}{\lambda f}\right]\right\} = -\frac{1}{\lambda^2 z f \pi} \exp\left\{jk\left[\frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right]\right\} \times \mathbf{F}\left\{F\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right] F^*\left[\frac{x_f}{\lambda f} - \frac{1}{T}, \frac{y_f}{\lambda f}\right]\right\} = -\frac{1}{\lambda^2 z f \pi} \times \exp\left\{jk\left[\frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right]\right\} g(x_0, y_0) \otimes g(x_0, y_0) \quad (11)$$

式中, $x_f = \frac{\lambda f}{T}$, $y_f = 0$ 。

从 (11) 式可以看出, $\frac{1}{\lambda^2 z f \pi}$ 是一常数, 是位相因子, 模为 1, 不影响相关输出面上能量的分布, 相关点极大值出现在 $(x_f = \frac{\lambda f}{T}, y_f = 0)$ 处。由傅里叶变换位移定理可知, 该系统与 $4f$ 匹配滤波系统一样具有平移不变性。

3 实验

实验中选取取样大小为 200×200 (像素) 含有字母 A 的图像作为目标图像, 字母 “A” 为待识别目标, “B”, “C”, “T”, “E” 为待识别图像中的假目标, 如图 1a 所示。选取大小为 200×200 (像素) 只含有字母



Fig 1 a—original object b—complex matched filter fabricated by CGH

“A” 的图像为参考图像, 采用罗曼 III 迂回位相编码法对参考图像进行计算编码, 得到 “A” 的复数滤波器, 如图 1b 所示。引入的二次项因子的焦距为 $f = 30\text{cm}$, 取 512×512 个抽样点。为了降低动态变化范围, 在傅里叶变换前, 引入随机位相函数。为了防止因矩形重叠而造成信息丢失, 采用模式溢出法。为了降低计算全息的量化噪声, 在分辨率为 640×480 显示器上用屏幕抓图, 每屏只取 256×256 点像素, 将原来 512×512 点分 4 次画出, 然后拼接在一块。经胶片制版获得底片, 在精缩机上缩微后, 得到大小约 $4.9\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ 的匹配滤波器全息图。放入如图 2 所示的光路中, 匹配结

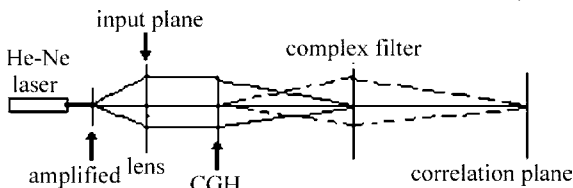


Fig 2 Optical correlation recognition system device

果如图 3b 所示, 其中入射光波长为 632.8nm 。图 3a 为在 PC 机上数值模拟得到的结果。可以看出, 在目标 A 对应的位置处出现了尖锐的相关峰 (横坐标表示像素位置, 纵坐标表示相对强度), 在假目标的对应位置处没有出现相关峰。说明该滤波器能够实现对真实目标的识别, 具有良好的排它性。另一方面, 对于待识别图像中不同位置处的字母 “A”, 分别出现了强度相

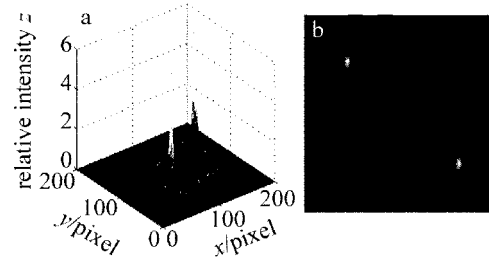


Fig 3 Result of optical correlation recognition

a—simulated matched correlation peak b—correlation dots of matched recognition

同的相关峰, 说明该滤波器对目标的识别具有平移不变性。图 3b 为光学实验中复数滤波器对目标图像的识别结果, 在数值模拟结果中出现的相关峰处, 出现了相关亮点, 验证了数值模拟的正确性。

4 结论

理论推导和实验结果表明, 利用计算全息技术简化光学相关匹配滤波系统是可行的, 而且用计算全息技术制作全息图灵活方便, 重复性高。在匹配滤波器的制作时, 可以方便灵活地引入二次相位因子, 缩短了系统的光路, 节省了光学元件。适用于光相关匹配滤波系统的小型化、集成化。而用光学方法制作这种滤波器时, 需要引入会聚光, 干涉光路复杂, 不易成功制作麻烦。因此, 计算全息技术在制作光学相关系统方面有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] WANG H X, ZHU Y Zh, ZHAO X K, *et al* Filtering system constituted with hohlens and application [J]. Journal of Shanxi Normal University, 2003, 31 (4): 50-53 (in Chinese).
- [2] Optical Instrument Teaching and Research Laboratory of Tsinghua University. Fundamental of information optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1985: 336-341 (in Chinese).
- [3] YU M W. Optical holography and information processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 72-73 (in Chinese).
- [4] LI Y H, LU W Y, ZHANG Y M. Fourier transform properties of multi-lenses and improvement of the compact optical system [J]. Chinese Journal of Lasers, 1988, A25 (10): 909-913 (in Chinese).
- [5] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 150-151 (in Chinese).
- [6] CHEN Q R, ZHOU J P, LI Q. Optical correlation recognition $2f + p$ system [J]. Laser Journal, 2003, 24 (1): 32-35 (in Chinese).
- [7] SHENG Zh X, WANG H X, HE J F, *et al* Computer generated hologram of asymmetry fractional Fourier transform [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 295-296 (in Chinese).
- [8] WANG H X, SHENG Zh X, MAO C R. Double random phase computer generated hologram of asymmetry fractional Fourier transform [J]. Laser Technology, 2005, 29 (6): 620-622 (in Chinese).
- [9] ZHANG Zh H, CHEN J X, WANG Q, *et al* The application of binary optical technique in the laser scanner of CO_2 laser imaging radar [J]. Laser Technology, 2001, 25 (2): 126-129 (in Chinese).
- [10] LU N G. Fourier optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 70-71 (in Chinese).