

用多次曝光全息透镜作散斑编码的图像处理

王肇圻 吴法祥 查宇 黄秋元

(南开大学现代光学研究所, 天津)

提要: 制备了一种新的全息光学透镜——MEHL。用该透镜实现了散射编码的白光图像处理, 还可用于狭缝一步彩虹术中。

Optical processing of images encoded by speckle by means of multi-exposure holographic lens

Wang Zhaoqi, Wu Faxiang, Cha Yu, Huang Qiuyuan

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

Abstract: A new kind of holographic optical lens, MEHL, is fabricated. White-light optical processing of images encoded by speckle is realized with this holographic lens. MEHL can also be used for one-step rainbow holography without slit.

一、引言

用激光散斑在白光图像处理中作编码的研究已有不少报道。然而狭缝调制散斑法^[1]使像面照度不匀, 物视场小; 多次曝光散斑屏和定向散斑屏法^[2,3]要求屏与感光干板密切接触, 而实际上又难以实现; 漫散屏定向移动法^[4]需要一扫描机构, 给操作带来困难。

本文提出一种改进的技术, 用一种新型的多次曝光全息光学透镜 (MEHL) 对待处理图像作激光散斑编码, 而后在白光系统中作诸如黑白图像假彩色编码、白光立体投影、彩色图像复现等各种处理。由于用该全息透镜作散斑编码有像面照度均匀、操作方便、不用密接等优点, 因而成为目前较为理想的方法。此外 MEHL 还可用于无狭缝一步彩虹

术中^[5], 取消了一般彩虹术由于狭缝的存在对物视场的限制, 并且无须移动漫散物或透镜。

二、多次曝光全息透镜的理论

多次曝光全息透镜的制备系统如图 1 所示。从激光器发出的相干光被分成两束。一束经扩束后被成像透镜 L 会聚, 并投射到全

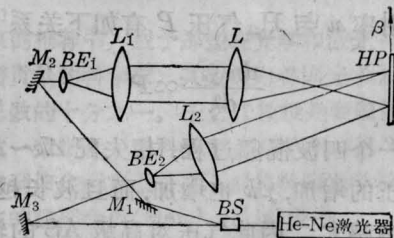


图 1 多次曝光全息透镜 (MEHL) 制备系统

收稿日期: 1987 年 7 月 6 日。

息干板 HP 上; 另一束经扩束作为斜入射参考光。根据对全息透镜孔径的实际要求调节 HP 和 L 之间的距离。全息透镜是经多次曝光记录而成, 对于每一次曝光, 全息干板都要沿横向移动一固定的距离 ε 。由几何关系可知, 全息透镜的数值孔径和成像透镜 L 的数值孔径相同。MEHL 的相干成像特点可由脉冲响应函数决定。设一成像系统的物平面、全息透镜平面、像平面的坐标分别为 (ξ, η) 、 (α, β) 、 (x, y) ; 其脉冲响应函数可由菲涅耳衍射近似求得:

$$\begin{aligned}
 h(x, y; \xi, \eta) &= -C \sum_{n=0}^{N-1} \iint \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_0} [(\alpha - \xi)^2 + (\beta - \eta)^2]\right\} \\
 &\quad \times \exp\left\{\frac{-i\pi}{\lambda f} [\alpha^2 + (\beta - n\varepsilon)^2]\right\} \\
 &\quad \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_i} [(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2]\right\} d\alpha d\beta \\
 &= -C \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_0} (\xi^2 + \eta^2)\right] \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda z_i} (x^2 + y^2)\right] \\
 &\quad \times \sum_{n=0}^{N-1} \delta\left(x + \frac{z_i}{z_0} \xi, y + \frac{z_i}{z_0} \eta - \frac{z_i}{f} n \cdot \varepsilon\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 z_0 为物距; z_i 为像距; f 为全息透镜的焦距; N 为制备全息透镜时的曝光次数。上式中的求和表明, MEHL 可把一个物点成像为沿 y 方向的多个像点, 各像点之间的距离为 $\frac{z_i \varepsilon}{f}$ 。因而当用这样的全息透镜对激光散斑场成像时, 可得到类同于多次曝光的散斑图。

三、用多次曝光全息透镜作散斑编码

用 MEHL 作散斑编码的光学系统如图 2 所示。由波长为 λ_0 的激光束照明漫散屏 D , 在其后得到散斑场 $S(\xi, \eta)$ 。全息透镜对两个输入图像分别成像作两次曝光, 对于第二次曝光, 感光干板需旋转 90° , 以获得相互正交的散斑图。设两个输入图像的光强透

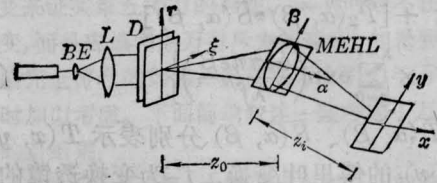


图 2 用 MEHL 作散斑编码的光学系统

率为 $T_1(\xi, \eta)$ 和 $T_2(\xi, \eta)$; 由 MEHL 的成像特性可知, 在 $\beta = -1$ 的成像条件下, 像平面上的辐照度为

$$\begin{aligned}
 E(x, y) &= [T_1(x, y)S(x, y)] \\
 &\quad * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x - 2n\varepsilon, y) \\
 &\quad + [T_2(x, y)S(x, y)] \\
 &\quad * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x, y - 2n\varepsilon) \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中 $*$ 表示卷积运算。而单个散斑的平均直径 d_s 与全息透镜的数值孔径成反比:

$$d_s = 1.22(1 + M) \frac{\lambda_0 f}{D} \quad (3)$$

M 为放大倍数。控制曝光量在 T - E 曲线的线性区, 所得编码片的振幅透过率为

$$T(x, y) = a - bE(x, y). \quad (4)$$

四、在白光系统中作散斑信息处理

利用散斑编码片作白光信息处理的系统如图 3 所示。将所制得的散斑编码片置于输入平面 P_1 上并用准直白光照明。对于特定波长 λ , 在 P_2 平面上的傅里叶频谱为

$$\begin{aligned}
 G(\alpha, \beta) &= \mathcal{F}\{T(x, y)\} \\
 &= a\delta(\alpha, \beta) - b\{[\tilde{T}_1(\alpha, \beta) * \tilde{S}(\alpha, \beta)] \\
 &\quad \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(\frac{i4\pi n\varepsilon\alpha}{\lambda f'}\right)\}
 \end{aligned}$$

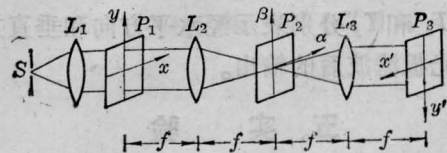


图 3 白光光学信息处理系统。

$$+ [\tilde{T}_2(\alpha, \beta) * \tilde{S}(\alpha, \beta)] \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(\frac{i4\pi n \varepsilon \beta}{\lambda f'}\right) \quad (5)$$

式中 $\tilde{T}(\alpha, \beta)$ 、 $\tilde{S}(\alpha, \beta)$ 分别表示 $T(x, y)$ 、 $S(x, y)$ 的傅里叶变换, f' 为变换透镜的焦距。求和运算代表一系列的窄脉冲。脉冲间距 d 和脉冲宽度 W 分别为

$$d = \lambda f' / 2\varepsilon \quad (6)$$

$$W = \lambda f' / 2N\varepsilon \quad (7)$$

单个散斑的最高空间频谱 ρ_{\max} 由一阶贝塞尔函数第一零点决定:

$$\rho_{\max} = 1.22/d\varepsilon \quad (8)$$

为在空间频率平面 P_2 上仅得到中央零级一个窄脉冲, 须使脉冲间距大于单个散斑的最高频谱所对应的空间坐标, 即

$$d \geq \lambda f' \rho_{\max} \quad (9)$$

代入(3)、(6)、(8)式, 可导出在制备全息透镜时干板每次移动的距离为:

$$\varepsilon \leq \frac{\lambda_0 f}{D} \quad (10)$$

在满足(10)式的条件下, (5)式所表示的傅里叶谱为分别卷积着图像 T_1 和 T_2 的频谱的两条正交条形衍射晕, 通过对条形晕作诸如空间滤波、彩色滤波、偏振滤波可实现信息的多道存储和提取、图像的彩色编码和彩色相加减、立体投影等图像处理。若在空间频率平面上用一条形遮光板分别遮住水平衍射晕和垂直衍射晕, 即可在输出平面 P_3 上分别得到由两个输入函数构成的输出:

$$I_{\perp}(x', y') = [|T_1(x', y')|^2 |S(x', y')|^2] * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x - 2n\varepsilon, y) \quad (11)$$

$$I_{\parallel}(x', y') = [|T_2(x', y')|^2 |S(x', y')|^2] * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x, y - 2n\varepsilon) \quad (12)$$

式中 I_{\perp} 和 I_{\parallel} 分别表示经水平方向和垂直方向遮光板滤波后的输出。

五、实 验

制备 MEHL 所用激光波长为 632.8

nm; 成像透镜 L 的数值孔径 $D/f = 1/10$ 。因而为满足(10)式的仅得中央零级窄脉冲的条件, 全息干板每次移动的距离为 $\varepsilon = 6 \mu\text{m}$ 。实验所取曝光次数为 $N = 7$, 所制全息透镜的焦距为 $f' = 280 \text{ mm}$ 。对于 $\lambda = 550.0 \text{ nm}$ 的特定波长, 由(7)式可得窄脉冲的宽度为 $W = 1.8 \text{ mm}$ 。为演示用 MEHL 作散斑编码和在白光系统中解码, 用图 4 所示的一组透明片, 按第三节所描述的方法做编码。而后将编码片置于图 3 的白光系统中。当仅遮住空间频谱的直流成份时, 得到图 5 所示的输出; 当用条形遮光板分别遮住水平衍射晕和垂直衍射晕时, 得图 6 左和图 6 右的图像输出。



图 4 用来作散斑编码的一组透明片图像



图 5 遮住零频分量后的输出图像



图 6 用条形滤波器分别遮住水平衍射晕和垂直衍射晕后的输出

参 考 文 献

- 1 母国光 *et al.*, 物理学报, **31** (11), 1547 (1982)
- 2 黄德根 *et al.*, 光学学报, **4**(2), 139 (1984)
- 3 母国光 *et al.*, 光学学报, **5** (2), 113 (1985)
- 4 王肇圻 *et al.*, 应用激光, **6**(3), 105 (1986)
- 5 A. Beaugard *et al.*, *Appl. Opt.*, **23** (18), 3095 (1984)