

图 像 识 别 的 干 涉 方 法

卢振武 顾去吾 李荫泉

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文提出了一种通过干涉进行图像识别的光学方法。把两张透明片叠在一起,使两者在横向有一相对位移,放在相干光路里,若两张透明片相同,则其夫琅和费场为匀排直线条纹所调制,根据直线条纹可判断两片的相似程度。但两片若有相对旋转,则会对识别效果有严重的影响。

一、引 言

1971年, Weigberger 提出了一种通过观察两张透明片的夫琅和费衍射场的干涉条纹进行图像识别的方法^[1]。这种方法只要把两张待比较的图片做成透明片,并排放在透镜前面,用准直单色光照明,在其后焦面上观察干涉条纹即可。若两张透明片相同,则干涉场为周期与两透明片中心相对位移成反比的匀排直线条纹;若不同,则无直条纹出现。这种方法比匹配滤波方法进行图像识别要简单得多。稍后,又有人提出用马赫-陈德尔干涉仪来实现两透明片振幅透射率相加^[2],这样,可以把两片分别放在干涉仪的两臂中,调整较为方便。但这种方法对反射镜表面的灰尘、振动、气流扰动等特别敏感。为了克服这些困难,我们把两张透明片直接叠在一起,在其谱面上观察干涉条纹,获得了比较满意的结果。

二、基 本 原 理

一般来说,对于一张透明片,其振幅透射率可表为直透与散射两部分之和,即:

$$t(x, y) = a + s(x, y), \quad (1)$$

式中 a 表示未受散射的光,为一常数; $s(x, y)$ 表示散射部分,它是透明片的信息携带者。

把两张振幅透射率分别为 $t_1(x, y)$ 和 $t_2(x, y)$ 的透明片叠在一起,并使两者在 x 方向上有一相对位移 d , 其振幅透射率为:

$$t(x, y) = t_1(x, y) t_2(x - d, y) = [a_1 + s_1(x, y)] [a_2 + s_2(x - d, y)], \quad (2)$$

将其置于傅里叶透镜的前焦面上,用准直单色光垂直照明,不考虑透镜孔径有限大小的影响,略去常数因子,透镜后焦面光场分布为:

$$T(\xi, \zeta) = a_1 a_2 \delta(\xi, \zeta) + a_2 S_1(\xi, \zeta) + a_1 S_2(\xi, \zeta) \exp(j2\pi\xi d/\lambda f) + S_1(\xi, \zeta) \otimes [S_2(\xi, \zeta) \exp(j2\pi\xi d/\lambda f)], \quad (3)$$

式中 $T(\xi, \zeta)$, $S(\xi, \zeta)$ 分别表示 $t(x, y)$ 、 $s(x, y)$ 的傅里叶变换, \otimes 表示卷积运算。

当 $t_1(x, y) = t_2(x, y)$ 时, (3) 式中第二、三两项会在谱面形成直线干涉条纹^[1]; 第一项为 δ 函数, 在谱面上是一亮焦点; 第四项为平行光经过第一张透明片的散射光, 经过第二张透明片后再次受到散射, 这一项一般来说是很小的^[8], 又由卷积的性质我们可知, 它分布在比 $S_1(\xi, \zeta)$ 大得多的区域里, 所以, 它对干涉条纹的影响可以不予考虑。

当 $t_1(x, y) \neq t_2(x, y)$ 时, 由 (3) 式可知, 谱面上不会有条纹出现。这样, 我们就可以根据谱面有无条纹出现来判断两张透明片的异同。

三、实验结果及讨论

在具体实验中, 若把两张透明片直接叠在一起, 调整起来就有机械上的困难。因此, 我们使用了 $4f$ 系统来实现两透明片相叠, 如图 1 所示, 把两张透明片分别放在 P_1, P_2 位置, 在 P_3 面上观察干涉条纹。

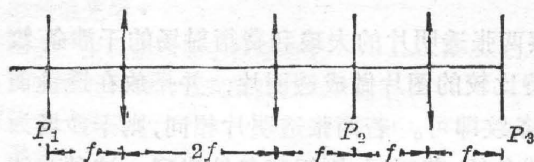
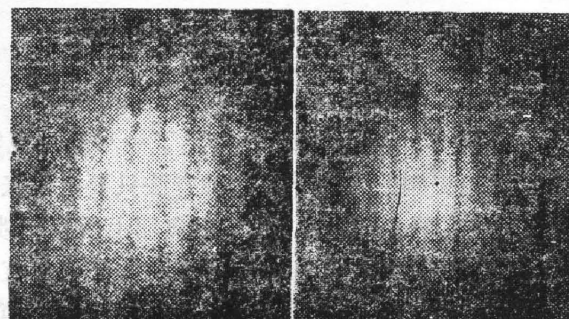


Fig. 1 Optical system for overlapping two transparencies



(a) (b)

Fig. 2

(a) Interference fringes of identical fingerprints;
(b) Interference fringes of identical landscapes

我们分别把指纹、普通景物做成透明片, 进行这一实验。图 2 即为两透明片相同时的干涉条纹。

若两张透明片不同, 则无论如何调整, 也得不到匀排直线干涉条纹。图 3 为两不同指纹的干涉图形。

以上干涉条纹是在较为理想情况下得到的, 在实际应用中, 两张透明片的相对旋转, 尺寸不同等因素都会影响到干涉条纹的对比度, 下面分别对这些情况加以讨论, 并给出相应的实验结果。

1. 相对旋转

在实际调整过程中, 一般来说, 两张透明片会有一定的相对旋转。设一张透明片相对另一张旋转了 α 角, 有旋转角的透明片的谱为^[1]:

$$S'(\xi, \zeta) = S(\xi \cos \alpha + \zeta \sin \alpha, \zeta \cos \alpha - \xi \sin \alpha), \quad (4)$$

在旋转角很小的情况下:

$$S'(\xi, \zeta) = S(\xi, \zeta) + \alpha \zeta \frac{\partial S}{\partial \xi} - \alpha \xi \frac{\partial S}{\partial \zeta}, \quad (5)$$

(5) 式中第一项为有用信号, 而后两项为由旋转而形成的噪音, 它们与旋转角 α , 坐标 ξ, ζ 成

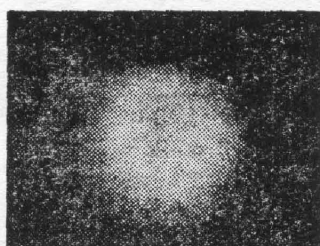


Fig. 3 Interference pattern of different fingerprints

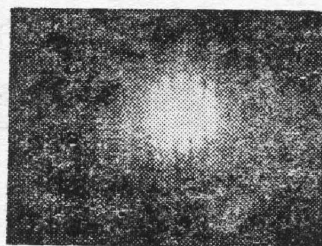


Fig. 4 Interference fringes of two transparencies with relative rotation of 0.4°

正比,因此,随着观察点远离中心对比度逐渐下降,直至条纹完全消失。

图 4 为两透明片相对旋转 0.4° 时的干涉条纹,从图中可以看出,条纹中心部分较为清晰,远离中心处的干涉条纹变得模糊,与理论分析相符。

2. 尺寸不同

在不同时间制作的透明片,即使是拍摄同一景物,也很难保证其尺寸完全相同,而这种不同将会对条纹产生严重的影响。

若一张透明片在制作时相对另一张透明片放大了 A 倍,则其振幅透射率可以写成 $s\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)$,如果用 $S(\xi, \zeta)$ 表示 $s(x, y)$ 的傅里叶变换,由傅里叶变换的相似性定理可知, $s\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)$ 的傅里叶变换为:

$$U(\xi, \zeta) = \frac{1}{A^2} s(A\xi, A\zeta), \quad (6)$$

式中 $U(\xi, \zeta)$ 为 $s\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)$ 的傅里叶变换。在 $|A-1|$ 很小的情况下,可以把 A 写成 $1+\alpha$, 在 $|\alpha\xi| \ll 1, |\alpha\zeta| \ll 1$ 的情况下,可把(6)式在 ξ, ζ 的邻域内展为泰勒级数,并略去二次以上的高次项:

$$U(\xi, \zeta) \approx \frac{1}{A^2} \left[S(\xi, \zeta) + \alpha\xi \frac{\partial s}{\partial \xi} + \alpha\zeta \frac{\partial s}{\partial \zeta} \right], \quad (7)$$

显然,式中后两项为噪音,它与 $\alpha\xi, \alpha\zeta$ 成正比,因此,条纹的对比度将随观察点远离中心而下降。图 5 为 $A=1.03$ 时两相同指纹的干涉条纹,从图中可以看出,其结果与理论分析一致。

由于尺寸不同造成的条纹对比度下降乃至条纹消失,可以通过对一张透明片成像而使两者尺寸相同或把两张透明片放在同一透镜后不同位置来克服。但后者光路和调整都要比前者简单得多。

一张透射率为 $s(x, y)$ 的透明片,放在透镜后、焦面前 d_1 处,用单色准直光照明透镜,焦面上振幅分布为^[4]:

$$U(\xi, \zeta) = B \exp[jk(\xi^2 + \zeta^2)/2d_1] (f/j\lambda d_1^2) \iint_{-\infty}^{\infty} s(x, y) \times \exp[-j2\pi(x\xi + y\zeta)/\lambda d_1] dx dy, \quad (8)$$

$s(x, y)$ 放大 A 倍后,放在焦面前 d_2 处,在焦面上的振幅分布为:

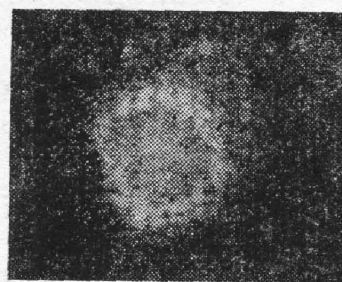


Fig. 5 Interference fringes with $A=1.03$

$$U'(\xi, \zeta) = B \exp[jk(\xi^2 + \zeta^2)/2d_2] (f/j\lambda d_2^2) \times \iint_{-\infty}^{\infty} s\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right) \exp[-j2\pi(x\xi + y\zeta)/\lambda d_2] dx dy, \quad (9)$$

调整 d_2 , 使得 $d_2 = Ad_1$, (9) 式为:

$$U'(\xi, \zeta) = B \exp[jk(\xi^2 + \zeta^2)/2d_2] (f/j\lambda d_1^2) \times \iint_{-\infty}^{\infty} s(x, y) \exp[-j2\pi(x\xi + y\zeta)/\lambda d_1] dx dy. \quad (9')$$

把两张透明片同时放在光路中, 在不考虑(3)式中第一、四两项的情况下, 焦面上的强度分布为:

$$I(\xi, \zeta) = \left| (Bf/j\lambda d_1^2) \iint_{-\infty}^{\infty} s(x, y) \exp[-j2\pi(x\xi + y\zeta)/\lambda d_1] \times dx dy \right|^2 4 \cos^2\{[k(\xi^2 + \zeta^2)/2][(1/d_1) - (1/d_2)]\}, \quad (10)$$

可见等位相线方程为一标准圆方程, 因此, 会在焦面上出现同心圆环。这样, 当两张透明片尺寸不同时, 我们可以根据焦面上是否出现圆条纹来判断两张透明片是否相同。

我们用两张相同但放大率不同的透明片做了这一实验, 得到了与理论分析一致的结果。图 6 为 $A=1.3$ 时得到的干涉条纹。

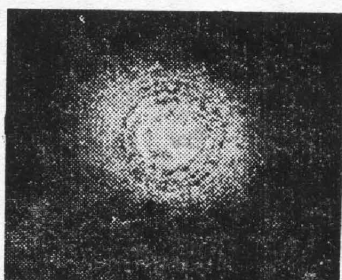


Fig. 6 Interference fringes with $A=1.3$

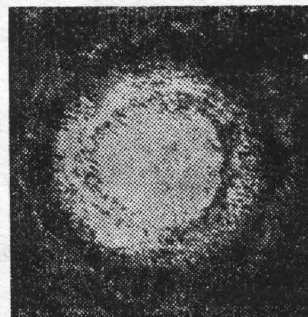


Fig. 7 Interference fringes of two transparencies with axial displacement

3. 两透明片有相对轴向位移

一般情况下, 采取成像的方法实现两张透明片相叠, 很难准确地把第二张透明片放在第一张透明片的像面上, 这样, 会使两张透明片在轴向上产生一定的相对位移, 因而会对于干涉条纹产生一定的影响。设两张透明片到变换透镜的距离分别为 d_1, d_2 , 在不考虑(3)式中零级项与卷积项的情况下, 透镜谱面的光强分布为:

$$I(\xi, \zeta) = 4|S(\xi, \zeta)|^2 \cos^2\{(\pi/\lambda f)((d_1 - d_2)(\xi^2 + \zeta^2)/2f] - \xi d\}, \quad (11)$$

其等位线方程为:

$$(\pi/\lambda f)((d_1 - d_2)(\xi^2 + \zeta^2)/2f] - \xi d = n\pi, \quad (12)$$

式中 n 为任意实数。上式也可改写为:

$$(\xi - [fd/(d_1 - d_2)])^2 + \zeta^2 = [2n\lambda f^2/(d_1 - d_2)] + [f^2 d^2/(d_1 - d_2)^2], \quad (13)$$

方程(11)为一圆方程, 中心位于 $(\frac{fd}{d_1 - d_2}, 0)$ 。可见, 两张透明片在轴向不重合时, 干涉条纹会由直线变为曲线。当两张透明片只有轴向位移而无横向位移时, 即 $d=0, d_1 - d_2 \neq 0$, (11)式为:

$$\xi^2 + \zeta^2 = 2n\lambda f^2 / (d_1 - d_2), \quad (14)$$

(14)式为中心位于坐标原点(焦点)的圆方程。这时干涉条纹是一组以坐标原点为中心的同心圆环。图7即为在 $d=0$, $d_1-d_2=55\text{ mm}$ 的情况下得到的干涉条纹。

4. 可以观察到条纹的区域

严格地说,条纹是定域在透镜的后焦面上的。但实际上,在焦前、焦后很远的地方也可以看到干涉条纹。理论上也可以证明这一点。很容易证明,一张振幅透射率为 $s(x, y)$ 的透明片,准确放在傅里叶透镜的前焦面上,在透镜后 z 处其振幅分布为:

$$S_s(\xi, \zeta) = \text{const} \iint_{-\infty}^{\infty} s(x, y) \exp[j\pi(1-z/f)(x^2+y^2)/\lambda f] \exp[-j2\pi(x\xi+y\zeta)/\lambda f] dx dy. \quad (15)$$

对于有横向位移的透明片,其振幅透射率为 $s(x-d, y)$,在 z 处的光场分布为:

$$S'_s(\xi, \zeta) = S_s(\xi, \zeta) \exp[-j2\pi d\xi/\lambda f] \exp[j\pi(1-z/f)(d^2+2xd)/\lambda f], \quad (16)$$

可见,当 $\exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f}\left(1+\frac{z}{f}\right)(d^2+2xd)\right] \approx 1$ 时,仍然可以看到直线干涉条纹。因此,只要 $\frac{\pi}{\lambda f}\left(1-\frac{z}{f}\right) \cdot (d^2+2x_{\max}d) \ll \pi$ 就可以了。令 $z=f+\Delta$,则有

$$\frac{\pi}{\lambda f} \cdot \frac{\Delta}{f} (2dx_{\max} + d^2) \ll \pi \quad (17)$$

或

$$\Delta \ll \lambda f^2 / (2dx_{\max} + d^2), \quad (18)$$

一般情况下, $x_{\max} \gg d$, 因此, (18)式可以近似表为:

$$\Delta \ll \lambda f^2 / 2dx_{\max}, \quad (19)$$

在透明片的最大半径为 10 mm , 两透明片相对位移 $d=0.5\text{ mm}$, $\lambda=6328 \times 10^{-7}\text{ mm}$, $f=850\text{ mm}$ 的情况下:

$$\Delta \ll 44\text{ mm}, \quad (20)$$

因此,在偏离焦面不太远的情况下,仍可以观察到较好的干涉条纹。这样,我们在观察干涉条纹时,只有大致把接收屏放在焦面上就可以了。

四、结 论

通过观察两张透明片的夫琅和费场的干涉条纹进行图像识别,要比匹配滤波方法简单得多,特别是采取了两张透明片直接叠合的方法,其实验装置尤其显得简单。由于它采取了共光路干涉,因此,对振动不敏感,也可以不用液门。我们认为,这种方法对识别清晰的指纹是切实可行的。

参 考 文 献

- [1] H. Weinberger *et al.*; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 11 (Nov), 2482.
- [2] T. Tsuruta *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 5 (May), 1089.
- [3] S. Mallick; *Common-Path Interferometers, in Optical Shop Testing*, ed. by D. Malacara, (New York, John Wiley & Sons, 1978), 83.
- [4] J. W. 顾德门;《傅里叶光学导论》, (科学出版社, 1979), 101.

An interference method for pattern recognition

LU ZHENWU, GU QUWU AND LI YINQUAN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 25 April 1985; revised 1 July 1985)

Abstract

In this paper, an interference method for pattern recognition is proposed. A test pattern may be compared with a reference pattern by overlapping the two transparent patterns with a lateral displacement in a coherent beam. If the two patterns are sufficiently similar, regular parallel fringes will modulate the common Fraunhofer diffraction pattern of the two samples being compared. The regularity of the interference fringes is a measure of the similarity between the two patterns.

The effect of even a small relative rotation, however, will limit severely the region of regularity of fringe patterns.



会议主席台
(高峰 摄)

中国科学院学部委员、院技术科学部主任、中国光学学会理事长王大珩教授(前排左二),中国科学院上海光学精密机械研究所所长、中国光学学会副理事长、光学学报主编王之江教授(前排左三),中国光学学会秘书长赖琮瑜高级工程师(前排左一)在中国光学学会一九八五年年会开幕式上(会议详细报道见本刊1985年第12期封三)