

# 图 像 的 光 学 处 理

## 前 言

检查给定的照片中是否存在指定的图像，判断两张照片的相似性，文字的自动识别或者把模糊的照片变清晰等，对这些照片、或文字（叫作图像）加以适当处理，抽取图像中所包含的信息，研究图像的性质，制备特殊用途的图像，这项技术叫作图像处理，目前正在进行着各种方法的试验。

当前，信息处理技术中代表性的工具是计算机，图像处理在计算机处理中占有较大的位置。图像的计算机处理过程是先把图像采样成很多采样点，各采样点的光强转换成数字之后输入到计算机里储存起来，并依次对各点进行计算，其计算结果用显示装置表示。这种计算不仅能对图像的光强分布进行处理而且对图像的振幅分布以及密度分布也能进行处理，尤其可以进行线性和非线性的各种处理，因此处理的种类是非常丰富的。但是，对于分辨本领较高的图像进行处理时，为了不使分辨本领受到损失，必须把采样点取得非常靠近。这样，采样点数增加，处理时需要相当长的计算时间和较高的处理费用。

为了弥补计算机处理的这个缺点，考虑到利用光的物理现象来计算的方法，这就出现了“光学信息处理”又叫作“图像的光学处理”的技术。这种方法虽然处理的种类有限、处理的精度也不那么高，但由于它能不加任何修饰地对图像进行处理，具有处理时间短的优点。

本文将对这个“图像的光学处理”作概略的叙述。

### 1. 图像的光学处理的基本操作

图像的光学处理利用一个平面内的光强分布或振幅分布转到另一平面上时所产生的光学现象。这时，它的基本操作有如下三种：

#### 1.1 积

##### (1) 利用透明图片的方法

这种方法是利用光透过透明图片时引起的光强或振幅的变化来进行的。放置记录光强透过率分布为 $g(x, y)$ 的透明图像图片，以均匀光束 $C_0$ 照明这个透明图片，透明图片后面附近位置上光束截面的光强分布用 $C_0 g_1(x, y)$ 表示，就得到 $C_0$ 和 $g_1(x, y)$ 的积。又在透明图片 $g_1(x, y)$ 前面很近的地方放置光强透过率分布为 $g_2(x, y)$ 的透明图片，则在透明图片的透过光束截面上得到 $C_0 g_1(x, y) g_2(x, y)$ 的光强分布。

如图1所示的 $P_1$ 面成像在 $P_2$ 面，这时 $P_1$ 面上放置 $g_1(x, y)$ 透明图片，用 $C_0$ 照明，在 $P_2$ 面上得到 $C_0' g_1'(x, y)$ 的像。这时在 $P_2$ 面上再放置 $g_2(x, y)$ 的透明图片，则在 $P_2$ 面近傍得到 $C_0' g_1'(x, y) g_2(x, y)$ 的光强分布。这时 $C_0' g_1'(x, y)$ 和 $C_0 g_1(x, y)$ 一般多少有些差异，关于这个问题，将在后面叙述。

上述有关光强分布的计算同样适用于振幅分布的情况。即上述的 $C_0, g_1(x, y), g_1'(x, y)$ ,

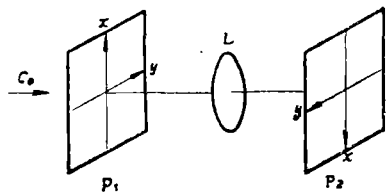


图1 图像的乘积

$$I(x, y) = |g_1(x, y) + g_2(x, y)|^2 = |g_1(x, y)|^2 + |g_2(x, y)|^2 + g_1^*(x, y)g_2(x, y) + g_1(x, y)g_2^*(x, y) \dots \dots \dots (1)$$

这个干涉条纹拍摄在  $\gamma = -2$  的感光材料上, 则这个透明图片的振幅透过率与  $I(x, y)$  成正比, 得到  $g_1(x, y)$  和  $g_2(x, y)$  的乘积。但是这个方法不单把必要的  $g_1 g_2^*$  记录下来, 与此同时还记录下许多其他的成分, 因此记录时对  $g_1(x, y)$ 、 $g_2(x, y)$  中的一个或对两个都加上容易解调的调制之后再取这个乘积, 而在解调时分离出必要的成分。

这种调制采用入射波面相对记录面倾斜使相位线性增加较为合适。如图3所示, 从  $P_1$  面入射到  $P$  面上的波面  $g_1(x, y)$  倾斜角为  $\theta$ , 则在  $P$  面得到

$$\Sigma_1(x, y) = g_1(x, y)e^{2\pi i x \sin \theta / \lambda} \dots \dots (2)$$

在这个波面上重叠垂直入射波面  $\Sigma_2(x, y) = g_2(x, y)$  则干涉条纹

$$I(x, y) = |\Sigma_1 + \Sigma_2|^2 = |g_1(x, y)|^2 + |g_2(x, y)|^2 + g_1(x, y)g_2^*(x, y)e^{2\pi i x \sin \theta / \lambda} + g_1^*(x, y)g_2(x, y)e^{-2\pi i x \sin \theta / \lambda} \dots \dots \dots (3)$$

把这个条纹在  $\gamma = -2$  的条件下照相记录, 如用  $\theta = 0$  的平行光  $C_0$  照射这个照相底片, 可知第1项、第2项是对应  $\theta = 0$  方向射出的光, 第3项是沿  $+\theta$  方向、第4项是沿  $-\theta$  方向射出的光。因此通过  $\theta$  或  $-\theta$  的选择, 所有要求的项都能选出。这个方法在雷斯——额普特尼克 (Leith Upatniks)<sup>[1]</sup> 全息照相中被应用。即,  $g_1(x, y)$  作为均匀的参考光,  $g_2(x, y)$  作为来自物体的衍射光, 便可接收在  $-\theta$  方向产生直接像的波面和  $\theta$  方向产生共轭像的波面。

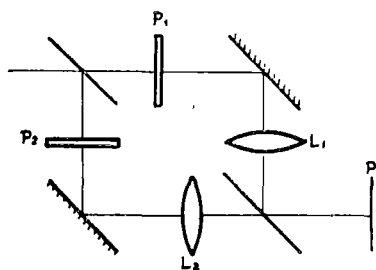


图2 振幅的乘积

### 1.2 光学变换

它是利用记录图像的透明图片的衍射光进行光学运算, 有利用菲涅尔衍射的变换和利用夫朗和费衍射的付里叶变换的区别。

一般在图4所示的开口  $P_1$  上垂直入射波长为  $\lambda$  的平行光, 则在与  $P_1$  面相距为  $Z$  的平行平面  $P_2$  上一点  $Q(\xi, \eta)$  处光的振幅分布是当  $Z$  充分大于  $P_1$ 、 $P_2$  面时表示成菲涅尔——基尔霍夫衍射积分, 即写成如下形式

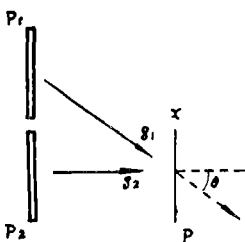


图3 线性相位调制例

$$u(\xi, \eta) = -\frac{iA}{\lambda} \frac{1}{Z} e^{-ikZ} \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) e^{ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2Z}} dx dy \dots \dots \dots (4)$$

其中  $(x, y)$ 、 $(\xi, \eta)$  分别表示  $P_1$ 、 $P_2$  面的直交坐标,  $A$  是常数,  $g(x, y)$  表示  $P_1$  面的振幅透过率分布。

这就是菲涅尔衍射， $g(x, y)$ 和 $u(\xi, \eta)$ 的关系叫作菲涅尔变换关系。如果 $Z$ 确定，则(4)式的前项是常数，而在光学处理中对输入和输出的图像往往不必考虑常数。

将(4)式化简

$$u(\xi, \eta) = \text{const} \cdot g(\xi, \eta) * Z(\xi, \eta) \dots \dots \dots (5)$$

$$Z(\xi, \eta) = e^{ik(\xi^2 + \eta^2)/2z} \dots \dots \dots (6)$$

其中 $*$ 表示卷积，它的定义为

$$f_1(x_2, y_2) * f_2(x, y) \equiv \iint_{-\infty}^{+\infty} f_1(x, y) \times f_2(x_2 - x_1, y_2 - y_1) dx_1 dy_1$$

而 $z(\xi, \eta)$ 相当于点物体的菲涅尔变换，相当于菲涅尔变换给出的点像振幅分布函数。

菲涅尔变换是可逆的，忽略常数，下式成立

$$z(\xi, \eta) * z^*(\xi, \eta) = \delta(\xi, \eta) \dots \dots \dots (7)$$

即如果在菲涅尔变换得到的振幅分布上通过相反方向的光进行衍射，可使原量的振幅分布再现出来。

菲涅尔射中 $z \rightarrow \infty$ 的极限叫作夫朗和费衍射。这时衍射像的振幅分布是

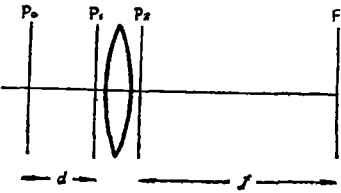
$$u(\xi, \eta) = \text{const} \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) e^{-2\pi i \frac{x\eta + \xi y}{\lambda z}} dx dy = \text{const} F[g(x, y)] \\ = \text{const} G\left(\frac{\xi}{\lambda z}, \frac{\eta}{\lambda z}\right) \dots \dots \dots (8)$$

$u(\xi, \eta)$ 表示衍射光的方向 $(\xi/z, \eta/z)$ 的函数，比例于 $g(x, y)$ 的付里叶变换 $G(\xi/\lambda z, \eta/\lambda z)$ 。这里 $F[\ ]$ 表示付里叶变换运算符号。 $G$ 的变数相当于空间频率 $(\mu, \nu)$ 。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \xi/\lambda z \\ \nu &= \eta/\lambda z \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

实际上不能直接实现 $z \rightarrow \infty$ 的条件，一般采用透镜的方法来实现这一条件。

图5表示的系统中，透镜L前相距 $d$ 处放有振幅透过率分布为 $g(x, y)$ 的透明图片，透镜前近傍 $P_1$ 面产生 $P_0 \rightarrow P_1$ 间的菲涅尔变换，从(5)、(6)式得到



$$u_1(x_1, y_1) = g(x_1, y_1) * e^{ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2d}} \dots \dots \dots \langle * \rangle$$

所以 $u_1(x, y_1)$ 经过透镜后在 $P_2$ 面得到 $u_1(x_1, y_1) \cdot S(x, y_1)$ 。因此透镜的像方焦平面 $F'$ 上得到的波面是根据 $P_2 \rightarrow F'$ 间的菲涅尔变换，忽略常数之后得到如下关系。

$$u(\xi, \eta) = [u_1(\xi, \eta) \cdot S(\xi, \eta)] * e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f}} = \iint_{-\infty}^{+\infty} [g(x_1, y_1) * e^{ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2d}}] \times e^{-ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}} e^{ik \frac{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2}{2f}} dx_1 dy_1$$

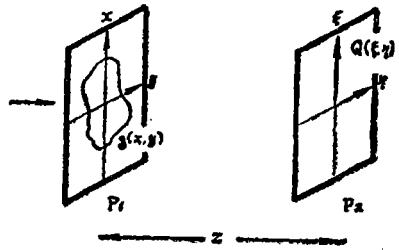


图4 菲涅尔衍射

$\langle * \rangle$  原文有误，译者已修改。

$$\begin{aligned}
&= e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f}} \iint_{-\infty}^{+\infty} \left[ g(x_1, y_1) * e^{-ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2d}} \right] \times e^{ik \frac{x_1 \xi + y_1 \eta}{f}} dx_1 dy_1 \\
&= e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f}} F \left[ g(x_1, y_1) * e^{ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2d}} \right] \\
&= e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f}} F \left[ g(x_1, y_1) \right] \cdot F \left[ e^{ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2d}} \right] \\
&= e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f}} G \left( -\frac{\xi}{\lambda f}, -\frac{\eta}{\lambda f} \right) \cdot e^{-\pi i \lambda d \left[ \left( \frac{\xi}{\lambda f} \right)^2 + \left( \frac{\eta}{\lambda f} \right)^2 \right]} \\
&= e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2f}} \left( 1 - \frac{d}{f} \right) G \left( \frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f} \right) \dots \dots \dots (10)
\end{aligned}$$

当式中  $d = f$ ，即  $P_0$  面在透镜  $L$  的物方焦平面  $F$  上，则得

$$u(\xi, \eta) = \text{const} G \left( \frac{\xi}{\lambda f}, \frac{\eta}{\lambda f} \right) \dots \dots \dots (11)$$

这是正规的付里叶变换，实现了夫郎和费衍射。这时的空间频率为

$$\mu = \xi/\lambda f, \quad \nu = \eta/\lambda f \dots \dots \dots (12)$$

透明图片  $g(x, y)$  放在透镜像方任意位置  $P_3$  面上时，如果  $P_3$  面和  $F'$  面的距离  $z$  不太小，则在  $F'$  面得到

$$u(\xi, \eta) = \text{const} e^{ik \frac{\xi^2 + \eta^2}{2z}} G(\xi/\lambda z, \eta/\lambda z) \dots \dots \dots (13)$$

虽然增加了相位项，但仍然能得到付里叶变换。这时空间频率和 (9) 式一样由  $z$  决定。

付里叶变换也有可逆性。根据付里叶变换性质下式成立

$$\left. \begin{aligned}
G(\mu, \nu) &= F[g(x, y)] \\
g(x, y) &= F^{-1}[G(\mu, \nu)]
\end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

对于由夫郎和费衍射得到的振幅分布  $G(\mu, \nu)$  通过相反方向的光进行夫郎和费衍射，则得到  $g(x, y)$ 。

光学变换的特殊例有积分。透镜焦平面上一点集中所有光瞳中方向余弦相同的光线，所以这个点的光强正比于和这个方向余弦平行的所有平行光线的积分值。因此可用于按不同的入射角求积分的场合。

### 1.3 光学成像

利用镜头进行光学成像，则可以作卷积运算。

光学成像中有相干光成像和非相干光成像的区别。相干光成像多采用图 6 所示的光学系

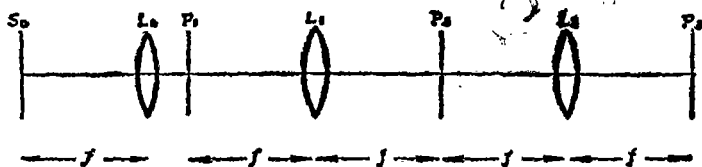


图 6 相干光学系统

统。图 6 中从点光源  $S_0$  发出的光束由透镜  $L_0$  形成平行光照明  $P_1$  面上的振幅透射率分布为  $g(x, y)$  的透明图片，则达到  $P_1$  面上任意两点的光都被同一个点光源发出的单色光照明，因此总是可以干涉，这样实现相干光成像。如果  $P_1$  放在透镜  $L_1$  的物方焦平面上，则该透镜的

像方焦平面产生比例于 $g(x, y)$ 的付里叶变换的衍射像 $G(\mu, \nu)$ 。在 $P_2$ 面放置振幅透过率为 $T(\mu, \nu)$ 的滤波器，通过滤波器的衍射光为 $G(\mu, \nu)T(\mu, \nu)$ 。

然后 $P_2$ 后放置透镜 $L_2$ ，如果 $P_2$ 放在 $L_2$ 的物方焦平面，则在 $L_2$ 的像方焦平面 $P_3$ 处得到 $G(\mu, \nu)T(\mu, \nu)$ 的付里叶逆变换，因此这个像的付里叶变换是等于

$$G'(\mu, \nu) = G(\mu, \nu)T(\mu, \nu) \dots \dots \dots (15)$$

这就是图像 $g(x, y)$ 的付里叶频谱被 $T(\mu, \nu)$ 空间滤波的波面。换言之，相干光学成像是两次付里叶变换串联起来连续进行的结果。其中 $T(\mu, \nu)$ 的作用是对付里叶频谱作乘积运算。作(15)式的付里叶逆变换，则得

$$g'(x', y') = g(x', y') * t(x', y') \dots \dots \dots (16)$$

$$t(x', y') = F^{-1}[T(\mu, \nu)] \dots \dots \dots (17)$$

$g'(x', y')$ 是 $g(x', y')$ 和 $t(x', y')$ 的卷积 $\langle * \rangle$ 。 $t(x', y')$ 是空间滤波器，是 $T(\mu, \nu)$ 的付里叶逆变换，因此把 $L_1, P_2, L_2$ 作为一个光学系统来考虑时 $t(x', y')$ 相当于点像的振幅分布函数，而 $T(\mu, \nu)$ 相当于光瞳函数。

下面考察图7所示的以扩展光源 $S_0$ 照明的情况。 $P_1$ 面上的任意两点没有相干性，成为非相干成像系统。这时都按光强分布计算，因此如果 $P_1$ 面放置光强分布为 $g_1(x, y)$ 的图像，则

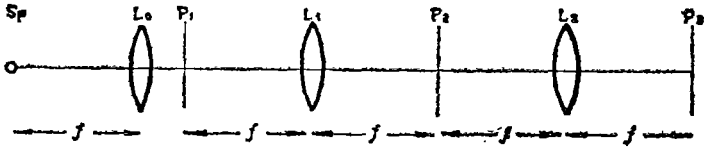


图7 非相干光学

$P_2$ 面不出现频谱，而 $P_3$ 面形成 $g_1'(x, y)$ 的像。这样的非相干成像系统也是两个付里叶变换系统连接而成的。但可认为不存在空间频谱面而一般理解为 $P_1 \rightarrow P_3$ 的直接成像。

现在把点光源放在 $P_1$ 面的中心，在 $P_3$ 面产生光强分布为 $t_1(x', y')$ 的像，则 $t_1(x', y')$ 叫作光学系统的点扩散函数。如果 $P_1$ 面的点光源位置任意移动时 $t_1(x', y')$ 的形式不变，则这个光学系统叫作空间移动不变或等晕成像系统。这时 $P_1$ 面的 $g_1(x, y)$ 和 $P_3$ 面的 $g_1'(x', y')$ 之间成立下述关系

$$g_1'(x, y') = g_1(x', y') * t_1(x', y') \dots \dots \dots (18)$$

取(18)式两边的付里叶变换，则得

$$G_1'(\mu, \nu) = G_1(\mu, \nu) \times T_1(\mu, \nu) \dots \dots \dots (19)$$

这表示对 $g_1(x, y)$ 的付里叶频谱作线性滤波。这时的传递函数在 $T_1(\mu, \nu)$ 是 $t_1(x', y')$ 的付里叶变换，叫作光学传递函数(OTF)。

非相干光学系统的 $t_1(x', y')$ 或者 $T_1(\mu, \nu)$ 不能直接任意地控制，所以产生间接的方法。在 $P_1$ 面中心放置点光源时，在 $L_2$ 的出射光瞳面上给出的振幅分布用 $f(\xi, \eta)$ 表示，则有如下关系

$$\left. \begin{aligned} f(\xi, \eta) &= A(\xi, \eta) e^{ik\omega(\xi, \eta)} && \text{在光瞳内部} \\ &= 0 && \text{在光瞳外部} \end{aligned} \right\} (20)$$

$$t_1(x', y') = |F[f(\xi, \eta)]|^2 \dots \dots \dots (21)$$

$$T_1(\mu, \nu) = F[t_1(x', y')] = f(\mu, \nu) \star f^*(\mu, \nu) \dots \dots \dots (22)$$

$\langle * \rangle$  原文有误，译者已修改。



$$|G(\mu, \nu)|^2 = F[g(x, y)] \cdot (F[g(x, y)])^* = F[g(x, y) \star g^*(x, y)] \dots\dots\dots (23)$$

这就相当于 $g(x, y)$ 的自相关函数的付里叶变换，即 $g(x, y)$ 的强度频谱（或叫功率谱）。

光学付里叶变换演运用于综合孔径方法的分析中，射电天文学中使用的微波天线多是把小的天线按圆形或者十字形排好的阵列，这样各天线组元接收的信号振幅和相位在 $P_1$ 面上模拟成与天线阵列排列相似的相干光学富里叶变换装置的输入组元，则 $P_2$ 面上得到微波源的像。一般作为这样的输入组元多利用超声调制元件。

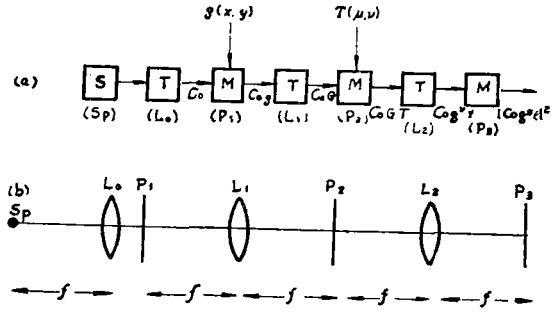


图10 两次衍射法

### 2.2 两次衍射法

用于相干光学的空间滤波装置有

两次衍射装置。图10(a)是它的程序图，(b)是光学系统，在 $P_1$ 面放置输入图像 $g(x, y)$ 的透明图片，在 $P_2$ 面放置振幅透过率为 $T(\mu, \nu)$ 的空间滤波器，在 $P_3$ 面得到输出图像。

$$F^{-1}[G(\mu, \nu)T(\mu, \nu)] = g^*t$$

空间滤波器有复数振幅透过率分布和特定形状的振幅滤波器或位相滤波器以及两者合并使用等各种类型。这样的振幅滤波器多数使用照相感光材料制备，相位滤波器一般使用真空镀膜方法蒸镀透明薄膜来制备，但利用随着曝光量改变透明记录介质的厚度或折射率的方法，即相位记录法都是有效的制备方法。

下面介绍几种主要的空间滤波形式。

#### (1) 增强对比和使边缘轮廓清晰的处理

低对比照片是由于比图像光强分布变化范围大的均匀背景加到照片上引起的。因此为了

取掉背景成分用如下形式的滤波器较为有效：

$$T(\mu, \nu) = C\delta(\mu, \nu) \quad 0 < C < 1 \dots\dots\dots (24)$$

如图11实线所示，这是一个在 $\mu = \nu = 0$ 处起作用的振幅滤波器。如用点线表示缓慢过渡的滤波器则图像中光强分布急剧变化部分被突出，获得边缘轮廓清晰的效果。

#### (2) 消除噪音

为了消除图像中所包含的噪音，使用阻挡噪音频谱只允许信号频谱通过的滤波器无疑是有效的。当已知信号为

$g_0(x, y)$ ，它的付里叶频谱为 $G_0(\mu, \nu)$ ，使用

$$T(\mu, \nu) = |G_0(\mu, \nu)| \dots\dots\dots (25)$$

形式的滤波器较为有效。

当噪音已知，可以作相减处理，但一般这种情况是不多的。作为特例，从网板图像消去网板点。在这种情况下，网板的光强分布是 $s(x, y)$ ，图像是 $g_0(x, y)$ ，则

$$g(x, y) = g_0(x, y) \cdot s(x, y) \dots\dots\dots (26)$$

因此付里叶频谱是

$$G(\mu, \nu) = G_0(\mu, \nu) \cdot S(\mu, \nu) \dots\dots\dots (27)$$

< \* >原文有误，译者已作修改。

如图12所示,  $G_0(\mu, \nu)$  分别选在  $S(\mu, \nu)$  的频谱  $S_{mn}$  周围, 因此采用只让  $S_{00}$  周围的  $G_0(\mu, \nu)$  通过的光栏  $T$ , 可得没有噪音的像。

不知道信号及噪音的形式, 已知它的统计性质的情况, 适宜采用把维诺——霍夫 (Wiener-Hopf) 滤波器推广到空间领域的滤波器

$$T(\mu, \nu) = \frac{|G_0(\mu, \nu)|^2}{|G_0(\mu, \nu)|^2 + |N(\mu, \nu)|^2} \dots\dots\dots (28)$$

其中  $|G_0(\mu, \nu)|^2, |N(\mu, \nu)|^2$  分别是信号和噪音的强度频谱。

(3) 模糊像的清晰化

照相时镜头的离焦和像差, 照相机或物体的移动, 大气抖动等引起像的模糊。把这些模糊的照片变清晰的处理叫作像质改善。

设物体和像的付里叶频谱分别为  $G(\mu, \nu), G'(\mu, \nu)$ , 透镜的光学传递函数 (OFT) 为  $H(\mu, \nu)$ , 根据 (21) 式

$$G'(\mu, \nu) = G(\mu, \nu)H(\mu, \nu)$$

成立。因此对于给定的模糊照片用

$$T(\mu, \nu) = 1/H(\mu, \nu) \dots\dots\dots (29)$$

的滤波器作空间滤波处理, 则消除透镜的光学传递函数的影响, 得到清晰的图片。这叫作逆滤波处理。

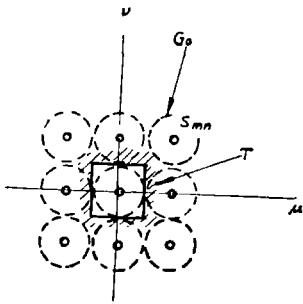


图12 网板的空间频谱

当  $H(\mu, \nu)$  已知, 可以制备这个逆滤波器。一般  $H(\mu, \nu)$  是

低通滤波器, 所以  $T(\mu, \nu)$  是高通滤波器, 又因  $H(\mu, \nu)$  是复数的情况较多, 这时的振幅滤波器用照相方法实现; 相位滤波器用蒸镀透明薄膜的方法实现, 但  $H(\mu, \nu)$  的形状复杂时制备这种滤波器非常困难。

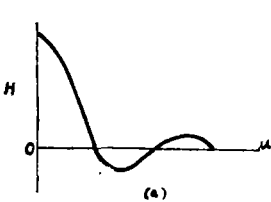
当图像有噪音时, (29) 式的滤波器虽然提高图像的分辨本领, 但由于使噪音明显, 故不合适的。对于包含噪音的像有人提出使滤波后的像和物体之间均方差最小的滤波器, 这个滤波器形式如下

$$T(\mu, \nu) = \frac{|G_0(\mu, \nu)|^2 H^*(\mu, \nu)}{|G_0(\mu, \nu)|^2 |H(\mu, \nu)|^2 + |N(\mu, \nu)|^2} \dots\dots\dots (30)$$

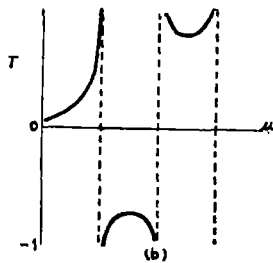
图13表示处理离焦情况的滤波器。

2.3 全息滤波

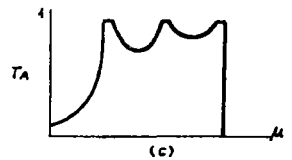
利用两次衍射法的空间滤波器用照相和透明薄膜来制备, 所以对复杂的情况制备较难。



(a) OTF



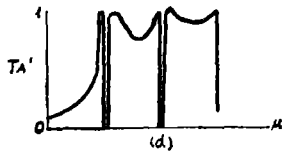
(b) 逆滤波器



(c)

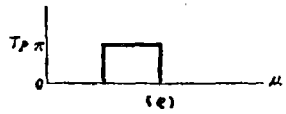
实用的近似振幅滤波器, 和 (c) 的相位滤波器组合使用

< \* >原文有误, 译者已作修改。



(d)

有噪音的振幅滤波器，  
由(30)式求得，和(e)  
的位相滤波器组合使用〈\*〉



(e)

相位滤波器，和(c)  
或(d)组合使用图

图13 校正离焦的滤波器

全息照相是振幅和相位被空间载波调制后记录，因此应用中利用全息照相方法制备空间滤波器，用相干光学处理方法作滤波处理。

全息滤波是同一个装置被用来制备全息滤波器和滤波处理两个方面。从装置本身去考虑易于理解。图14(a)是最简单的瑞利干涉仪装置，在 $P_1$ 面的中心部放置图像 $g_1(x, y)$ ，沿 $x$ 方向相距为 $a$ 的 $P_{12}$ 部位放置图像 $g_2(x, y)$ ，在 $P_2$ 面摄得全息照片，则 $P_2$ 面的全息图是 $G_1(\mu, \nu)$ 和 $G_2(\mu, \nu)e^{-2\pi i a \mu}$ 的干涉图形，它的振幅透过率是

$$T(\mu, \nu) = \{ |G_1|^2 + |G_2|^2 + G_1^* G_2 e^{-2\pi i a \mu} + G_1 G_2^* e^{2\pi i a \mu} \dots \dots \dots (31)$$

把这个全息照片显影定影之后放回原来照全息图时的位置上，在 $P_{11}$ 面放置 $g_3(x, y)$ 的图像进行再现，则(31)式的第二项以及第三项给出在 $P_{32}$ 、 $P_{33}$ 面成像的波面，表示成

$$P_{32}: g'(x, y) = F^{-1} [G_1^* G_2 G_3] \\ = (g_1^* \star g_2) * g_3 \\ = (g_1^* \star g_3) * g_2 \dots \dots (32)$$

$$P_{33}: g''(x, y) = F^{-1} [G_1 G_2^* G_3] \\ = (g_1 \star g_2^*) * g_3 \\ = (g_2 \star g_3) * g_1 \dots \dots (33)$$

因此适当选择 $g_1(x, y)$ 、 $g_2(x, y)$ 、 $g_3(x, y)$ 的图像，可以实现(32)式、(33)式表示的演算。图14(b)表示这个程序图。

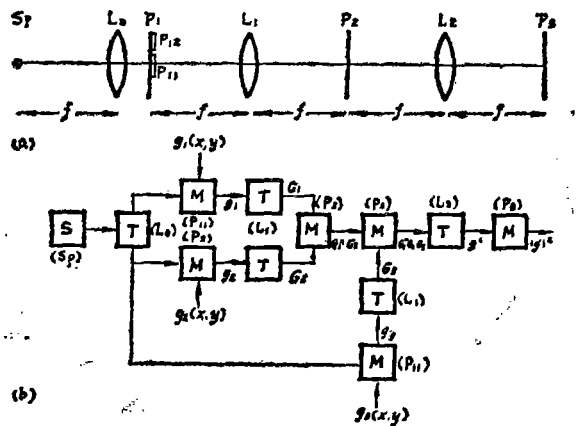


图14 全息滤波

(1) 相关——光学匹配滤波器

在信号 $g_0(x, y)$ 上加噪音 $n(x, y)$ 的图像

$$g(x, y) = g_0(x, y) + n(x, y)$$

经过一种滤波器使信噪比增到最大，这种滤波器就叫作匹配滤波器。这个滤波器由下式表示

$$T(\mu, \nu) = G^*(\mu, \nu) / |N(\mu, \nu)|^2 \dots \dots \dots (34)$$

当 $n(x, y)$ 是白噪音时， $|N(\mu, \nu)|^2$ 是常数，有效的滤波器具有 $G^*(\mu, \nu)$ 的形式，用全息照相方法容易实现。

比如在 $P_{11}$ 放置 $g_0(x, y)$ ，在 $P_{12}$ 放置点光源 $\delta(x, y)$ 摄得全息图，则从(31)式得如下关系

$$T(\mu, \nu) = \{ |G_0|^2 + |B_0|^2 + G_0^* B_0 e^{-2\pi i a \mu} + G_0 B_0^* e^{2\pi i a \mu} \dots \dots \dots$$

从第二项得到上述滤波器〈\*〉。因此在 $P_{11}$ 放置 $g(x, y)$ 再现则在 $P_{32}$ 处得到

$$g'(x, y) = g^*(x, y) \star [g_0(x, y) + n(x, y)] \\ = g_0^*(x, y) \star g_0(x, y) \dots \dots \dots (35)$$

〈\*〉原文有误，译者已作修改。

产生 $g_0 * g_0$ 的自相关。当 $g_0(x, y)$ 接近随机分布时 $g'(x, y)$ 几乎成为 $\delta(x, y)$ ，存在 $g_0(x, y)$ 的位置产生亮点。因此，用于在图像中检出已知信号的位置，辨别指纹，文字读取，分析运动物体，从体视照片测定地形等方面。

(2) 符号变换

在 $P_{11}$ 放置 $g(x, y)$ ,  $P_{12}$ 放置 $f(x, y)$ 摄得全息图, 而后在 $P_{11}$ 放置 $g(x, y)$ 再现, 则从(32)式在 $P_{32}$ 得

$$g' = (g * \star g) * f \dots \dots \dots (36)$$

若 $g(x, y)$ 接近随机分布, 则 $g * \star g = \delta$ , 故 $g' = f_1$ 得到 $f(x, y)$ 。同样, 在 $P_{11}$ 放置 $f(x, y)$ 再现则在 $P_{32}$ 得到 $g(x, y)$ 。根据这个方法进行 $g(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 的相互变换。这叫作符号变换, 用于文字读取、信息检出等。

(3) 消去卷积

模糊的像用物体的光强分布 $O(x, y)$ 和点扩散函数 $h(x, y)$ 的卷积 $O(x, y) * h(x, y)$ 表示时, 从模糊像消去 $h(x, y)$ 影响得到清晰的像叫作消去卷积处理。这时在 $P_{11}$ 放置 $h(x, y)$ , 在 $P_{12}$ 放置 $\delta(x, y)$ 摄得全息图, 则由(31)式的第二项产生 $T(\mu, \nu) = \text{const} H^*(\mu, \nu)$ 所需要的滤波器。把这样的全息图用放在 $P_{11}$ 而的模糊图像 $O(x, y) * h(x, y)$ 再现, 则在 $P_{32}$ 得到

$$g'(x, y) = O(x, y) * [h^*(x, y) \star h(x, y)] \dots \dots \dots (37)$$

因此, 如果 $h^*(x, y) \star h(x, y) = \delta(x, y)$ 则得到 $g'(x, y) = O(x, y)$ 的结果 $\langle * \rangle$ 。这样的例子有随机分布的多孔针孔照相情况, 但一般的情况也有一定的效果。要进一步提高效果, 则使这个全息照片与 $1/|H(\mu, \nu)|^2$ 的振幅滤波器一起使用, 得到

$$T(\mu, \nu) = H^*(\mu, \nu) / |H(\mu, \nu)|^2 = 1/H(\mu, \nu) \dots \dots \dots (38)$$

与(29)式相同, 实现了逆滤波器。

(4) 相减处理

利用全息空间滤波处理图像, 还有和上述方法不同的相减处理方式。这种方式有两种方法。在 $P_{11}$ 处放置 $g(x, y)$ ,  $P_{12}$ 处放置 $\delta(x, y)$ 拍摄全息图, 再现时 $P_{11}$ 放置 $f(x, y)$ ,  $P_{12}$ 放置 $\delta(x, y)$ 。如以负片形式拍摄全息照片, 在 $P_{31}$ 处得到 $f(x, y) - Cg(x, y)$ , 实际的输出像是以 $|f(x, y) - Cg(x, y)|^2$ 表示的光强分布。其中 $C$ 是由全息照片衍射效率决定的常数。当全息照片对比反转以正片形式摄得, 可实现相加处理, 把它当作一种实时的全息干涉术更易于理解。

第二种方法是在一块全息照相板上重迭记录几个图像, 它是两次曝光法或时间平均法全息干涉术的一种。先在 $P_{11}$ 放置 $g(x, y)$ 、在 $P_{12}$ 放置 $\delta(x, y)$ 拍摄全息照片, 然后在 $P_{11}$ 放置 $f(x, y)$ 、 $P_{12}$ 放置 $\delta(x, y)e^{i\phi}$ 进行重迭摄影记录, 并以 $P_{12}$ 处的 $\delta(x, y)$ 将这个全息照片再现, 得到 $g(x, y) - Cf(x, y)$  (光强分布是 $|g(x, y) - Cf(x, y)|^2$ )。式中 $C$ 仍为衍射效率决定的常数。这种方法在检出两个图像差别, 消除已知形状的噪音等方面有着广泛的用途。

(5) 计算机全息照相的利用

也可以利用电子计算机制备全息照片的方法代替照相方法拍摄全息照片。这种方法对复杂的图形难以制备, 不如摄影方法好, 但用于简单的符号变换、微分等处理是常用的方法。

### 3. 非相干光学处理

非相干光学处理是对图像的光强分布进行演算。因此不能利用相干光学系统的干涉现象,

$\langle * \rangle$ 原文有误, 译者已作修改。

处理性能受到限制，但输入图像只考虑光强透过率（或反射率），不必像相干光学处理那样特殊考虑输入图像。

因此它具有能够直接输入普通照片、印刷文件、阴极射线管(CRT)图像的 优点。但这种处理有时也部分地使用相干光学处理，这种情况下对输入图像的考虑跟相干光学处理相同。

这时通常使用扩展光源，特殊情况也有的使用点光源。原则上不需要单色性，但为了克服透镜的色差，多使用单色光。

下面举非相干处理的几个代表性的例子。

### 3.1 相关

这是求两个图像 $g(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 的互相关的方法，利用了图像的乘积和积分。最简单的方法如图15 (a) 所示，平面 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 平行放置，在 $P_1$ 放置 $g(x, y)$ ，在 $P_2$ 放置 $f(x, y)$ ，用扩展光源照明，则在 $P_3$ 面得到具有比例于 $g(X, Y) \star f(X, Y)$ 的光强分布的像。但这个方法中 $(x, y)$ 、 $(\mu, \nu)$ 、 $(X, Y)$ 各坐标之间标度不同，不实用。由图15(b)所示把 $P_1$ 、 $P_2$ 放在透镜L之前，使 $P_1$ 、 $P_2$ 的距离等于L的焦距， $P_3$ 放在L的后焦点。这时，透镜L起着一种积分器的作用。利用这个光学变换作程序图(c)的相关处理。特别是当必须测量自相关时，使用图15(d)的改进形。这时利用平面反射镜 $M_2$ 的反射，使光两次通过透明图片，因此可只用一个输入图像。

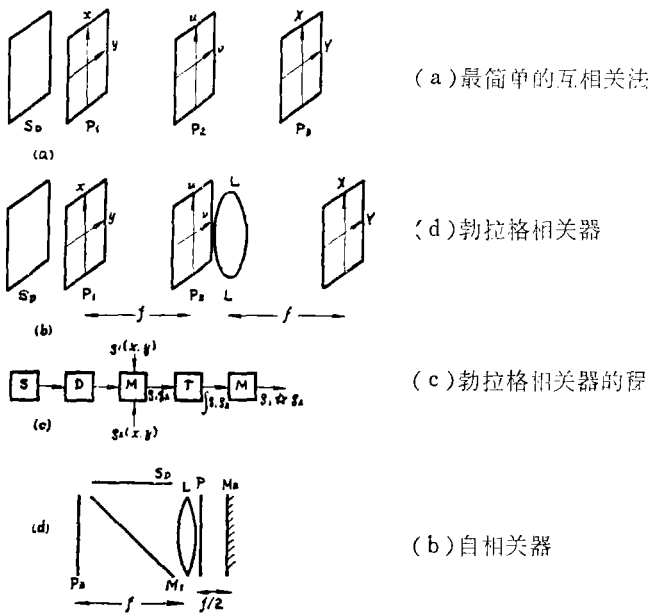


图15 相 关

作为配合使用光电测量方法的还有图16所示的方法。点光源S在透镜 $L_1$ 的前焦点，平行光中放置两张图片 $P_1$ 、 $P_2$ ，由此透过的光利用透镜 $L_2$ 会聚，在 $L_2$ 的后焦点放置足够大的开口并用光电元件 $P_M$ 接收。当 $P_1$ 、 $P_2$ 的图片分别为 $g(x, y)$ ， $f(x, y)$ ，两个图像的原点偏离 $(x, y)$ ，则输出正比于 $g(x, y) \star f(x, y)$ ，因此改变 $(x, y)$ 的同时测得输出就得到互相关 $\langle \star \rangle$ 。这时 $L_2$ 起积分器的作用。

< \* >原文有误，译者已作修改。

### 3.2 匹配滤波器

给定伴有白噪声信号  $g_0(x, y)$  时, 如果实现 OTF 为  $G_0^*(\mu, \nu)$  的光学系统, 则这个成像系统对  $g_0(x, y)$  起着匹配滤波作用。这样的光学系统可以用非相干光学系统来实现。

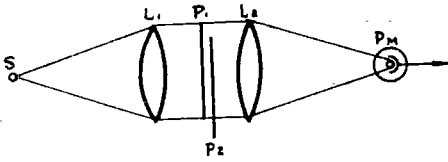


图16 组合使用光电测光的相关器函数成像系统, 则该光学系统对于

$$g(x, y) = g_0(x, y) + n(x, y)$$

的图像进行成像, 则

$$\begin{aligned} g'(x, y) &= g(x, y) * g_0(-x, -y) \\ &= [g_0(x, y) + n(x, y)] * g_0(-x, -y) \\ &= g_0(x, y) \star g_0(x, y) + \text{const} \dots \dots \dots (40) \end{aligned}$$

的自相关实现匹配滤波。但(40)式包含常数项, 在像面重迭几乎相似的背景, 因此输出像的对比不如相干光学处理好, 当以光电接收时, 须注意设定阈值。

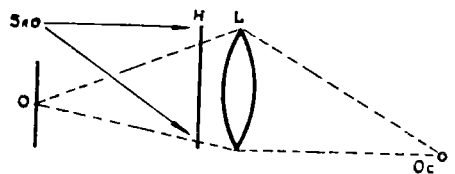
对于任意的  $g(x, y)$ , 有如下 3 种方法可实现  $g_0(-x, -y)$  的点扩散函数方法。

#### (1) 利用全息照相的方法

如图17所示,  $S_R$  作为参考光束, O 面放置  $g_0(x, y)$ , 摄得无透镜付里叶变换全息图, 然后在 O 的位置放置点光源再现这个全息图, 透镜 L 放在 H 后面, 则在  $Oc'$  处得  $g_0(-x, -y)$  的再现像。即这个全息照片 H 和透镜 L 的组合形成沿  $Oc'$  方向成像的系统, 从而得出  $g(-x, -y)$  的点扩散函数, 因此如在 O 处放置  $g(x, y)$ , 则  $Oc'$  产生(40)式表示的输出像。

#### (2) 相位记录方法

相位记录方法是把物体的菲涅尔变换或付里叶变换产生的振幅分布和相位部分用漂白卤化物乳剂记录的相位滤波片实现的, 可把这个和透镜一起使用。相位记录方法和全息照相一样用点光源再现原来物体的像, 因此把它旋转  $180^\circ$  就成为  $g_0(-x, -y)$  点像分布的成像系统。因此可以和以前一样用这个光学系统作  $g(x, y)$  的像。



#### (3) 利用付里叶频谱对称性的方法

这个方法是用相干光学系统求得输入图像  $g_0(x, y)$  的付里叶频谱, 利用它的对称性实现匹配滤波。

如图 18 所示, 在一个付里叶变换光学系统  $T_1$  的输入面  $P_1$  放置振幅分布  $g(x, y)$  的透明图片, 则在 P 面得到强度频谱  $|G(\mu, \nu)|^2$ 。在这个面放置漫射板使相位混乱, 则 P 面成为比例于光强分布  $|G(\mu, \nu)|^2$  的非相干光源。在第二个付里叶变换系统的输入面  $P_2$  放置振幅分布  $f(x, y)$  的透明图片,  $T_2$  成为  $P \rightarrow P'$  的成像系统, 它的点扩散函数是  $|F(\mu, \nu)|^2$ 。另一方面如  $g(x, y), f(x, y)$  是没有共同相位分布的图像, 则  $|G(\mu, \nu)|^2, |F(\mu, \nu)|^2$  都是对一个点对称的, 因此  $P'$  面的像是  $|G(\mu, \nu)|^2 * |F(\mu, \nu)|^2 = |G(\mu, \nu)|^2 \star |F(\mu, \nu)|^2$ , 故实现匹配滤波。

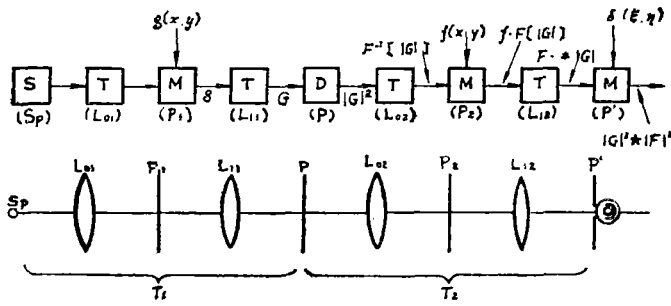


图13 利用相干光学系统的非干匹配滤波器

这个方法是利用强度频谱，所以具有 $P_1, P_2$ 面上输入图像平移时不敏感，相关时位置容易对准的优点。

### 3.3 滤波

这是利用非相干光学系统成像时的空间频率滤波的方法，只能实现低通滤波，因此用途有局限性。

非相干光学系统不能直接给出 $OTF, T(\mu, \nu)$ ，而由光学系统光瞳中的振幅透过率分布，即光瞳函数的形式给出，因此程序图以图19示出。

#### (1) 离焦

使用透镜离焦， $OTF$ 的高频部分降低，实现低通滤波。这时 $OTF$ 特性由图20示出，第

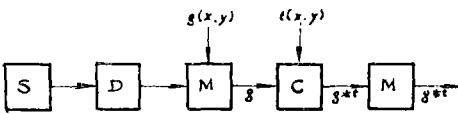


图19 非相干成像系统

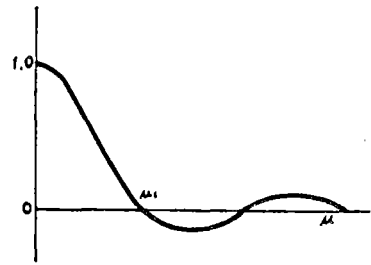


图20 离焦的 $OTF$

一个 $OTF$ 零点的频率 $\mu$ ，当 $d$ 不太小时由下式给定

$$\mu_1 = 1.22F(1+m)/|d| \dots\dots\dots (41)$$

因此直到 $\mu_1$ 频率实现低通滤波。其中 $F$ 是透镜的 $F$ 数， $m$ 是倍率， $d$ 是离焦量。这时从 $\mu = 0$ 到 $\mu_1$ 为止是单调下降，然而 $\mu_1$ 以上也被透过，所以不适宜作非常严密的处理。

#### (2) 统计滤波

如图21，透镜光瞳上混乱地放置形状相同并远小于光瞳尺寸的振幅和相位滤波器，这时 $OTF$ 为

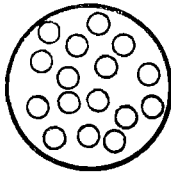
$$T(\mu, \nu) = T_0(\mu, \nu)T_s(\mu, \nu) \dots\dots\dots (42)$$

其中 $T_0$ 是透镜本身的 $OTF$ ， $T_s$ 是混乱的滤波器占光瞳的足够大的部分时的 $OTF$ ，它等于

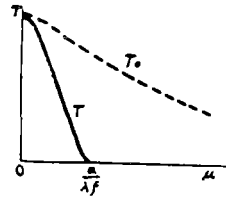
$$T_2(\mu, \nu) = (1-\rho)T_2(\mu, \nu) + \rho \dots\dots\dots (43)$$

其中 $T_2(\mu, \nu)$ 是一个单元滤波器的 $OTF$ ，如果它的光瞳函数为 $f(\mu, \nu)$ ，则根据 $T_2(\mu, \nu) = f(\mu, \nu) \star f^*(\mu, \nu)$ 来计算，若 $f(\mu, \nu)$ 分布相同，其值为 $f_0$ ，则表示成

$$\rho = |1-q + qf_0|^2 \dots\dots\dots (44)$$



(a)



(b)

图21 统计滤波器

其中  $q$  是滤波器面积的总和与光瞳面积之比。

例如取直径为  $a$ ,  $f_0 = g^{-1}$ ,  $q = 1/2$ , 则得到图21(b)所示的低通滤波, 不挡住光瞳得到与光阑直径为  $a$  的光学系统相同的OTF。

(3) 利用相位记录的方法

利用相位记录, 可实现产生出任意形式的点扩散函数  $t(x, y)$  的相位滤波器, 因此  $t(x, y)$  已知, 则可作出光学系统。

当低通滤波的情况下,  $t(x, y)$  都是正的函数, 所以问题不大。而高通滤波或带通滤波的情况,  $t(x, y)$  有负值部分, 不能实现。可是这时加上实数  $t_0$ , 变成

$$t'(x, y) = t(x, y) + t_0 \geq 0 \dots\dots\dots (45)$$

则可实现  $t'(x, y)$ 。

用这样的光学系统把  $g(x, y)$  成像, 得

$$g'(x, y) = g(x, y) \star (t(x, y) + t_0)$$

$$g(x, y) \star t(x, y) + \text{const} \dots\dots\dots (46)$$

由于实数部分整个对比下降, 因此得到图22所示的OTF, 与低通滤波器不同, 实际上能实现高频的带通滤波器。

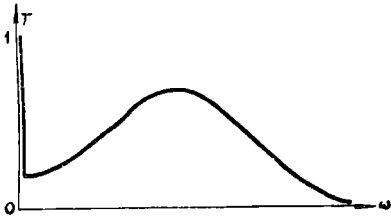


图22 OTF

## 结 语

本文介绍了利用光学作图像处理的方法, 并从这个角度对代表性的方法作了说明。除了这些方法, 图像处理中还有照相处理、利用非线性的方法、配合使用光电测光的方法, 使用特殊摄像管的方法等, 不胜枚举。本文以介绍光学方法为主, 其他的省略了。

正如文章开始时指出的那样, 利用光学方法的图像处理具有比计算机处理运算时间短, 分辨本领高的优点, 但也存在运算种类有限, 处理精度不高的缺点。因此光学处理不像计算机处理那样适于成为通用处理装置, 但作为限定用途的足够实用的专用装置是完全胜任的, 并可以根据使用目的配合使用小型计算机。但遗憾的是, 就目前来说, 它不一定是容易使用的, 还要晚一些时候才能成为操作方便的仪器设备。因此, 选择适当的用途, 实现实用化的成套仪器设备将成为光学处理实用化的捷径。

译自《计测と制御》Vol13, No.1, P.77.1974.

(韩昌元译)