

第五章 傅里叶变换光学

第四节 信息光学图像处理技术

5.4 信息光学图像处理技术

5.4.1 光学图像处理概述

5.4.2 空间滤波实验

5.4.3 相干光学图像处理系统

5.4.4 图像的加减与微分

5.4.5 图像的色彩处理

5.4.6 光学图像处理实际应用举例

5.4.1 光学图像处理概述

光学图像处理概述

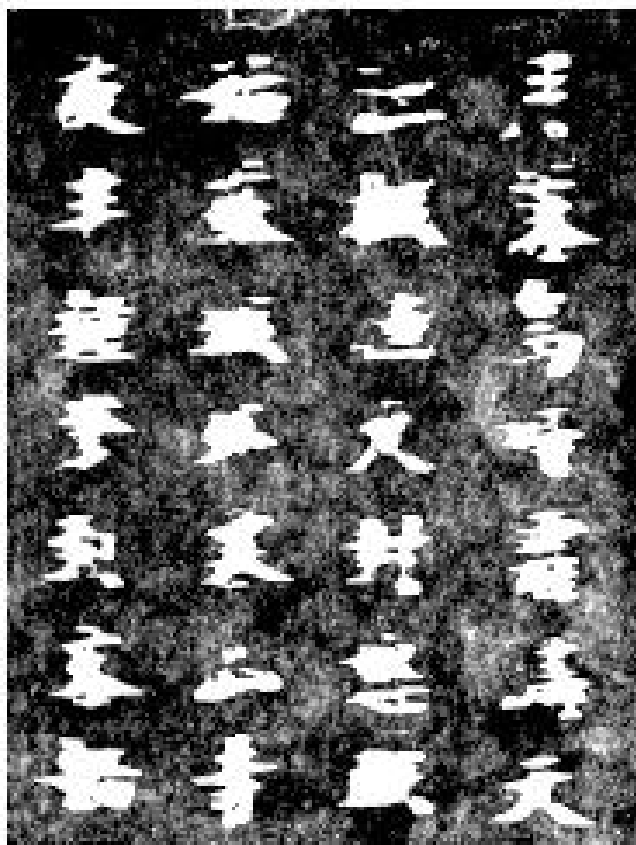
光学图像处理的对象：光学图像，包括照片、底片、图片等。

图像处理的目标：改变图像的反差，使模糊图像清晰化，消除图像中的噪声，图像相加减，特征识别，对黑白图像进行假彩色编码，等等。

其他类型信号的处理：被处理信息是这些信号必须首先转换成光信号或光学图像，然后用光学信息处理系统进行处理。如：电信号(电压、电流)，机械信号(重量、长度、角度、速度、应力应变)，声音信号，温度信号...

5.4.1 光学图像处理概述

光学图像处理概述



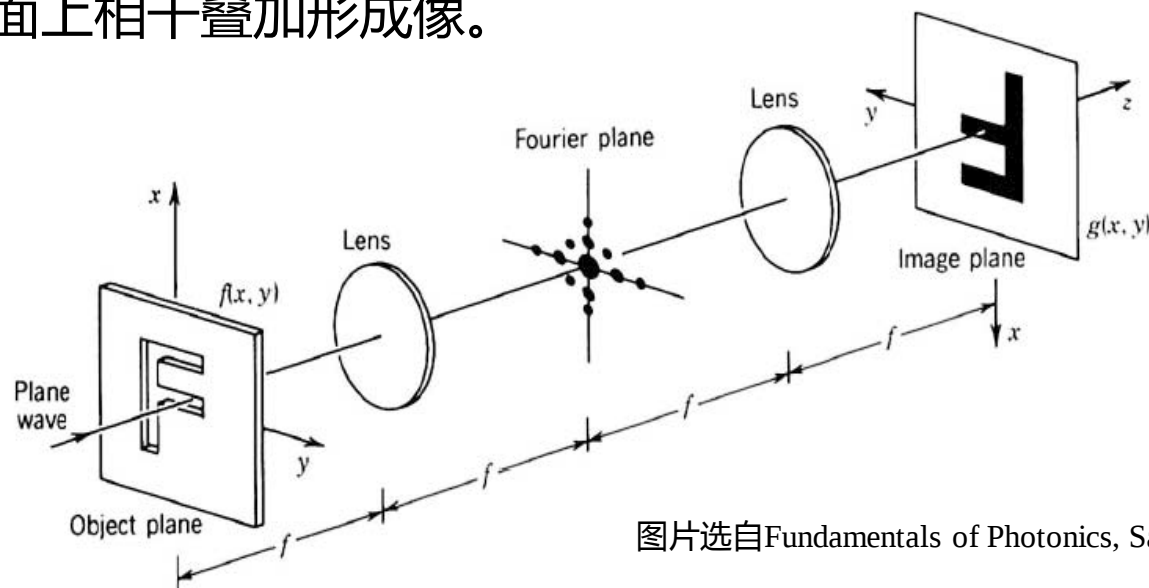
较高空间频率的分量决定了图像的细节

5.4.2 空间滤波实验

空间滤波的概念

相干光学系统的概念

按照阿贝成像原理，物光波首先在傅氏面上形成衍射斑，然后衍射斑发出的光波在像平面上相干叠加形成像。



图片选自Fundamentals of Photonics, Saleh & Teich

原理

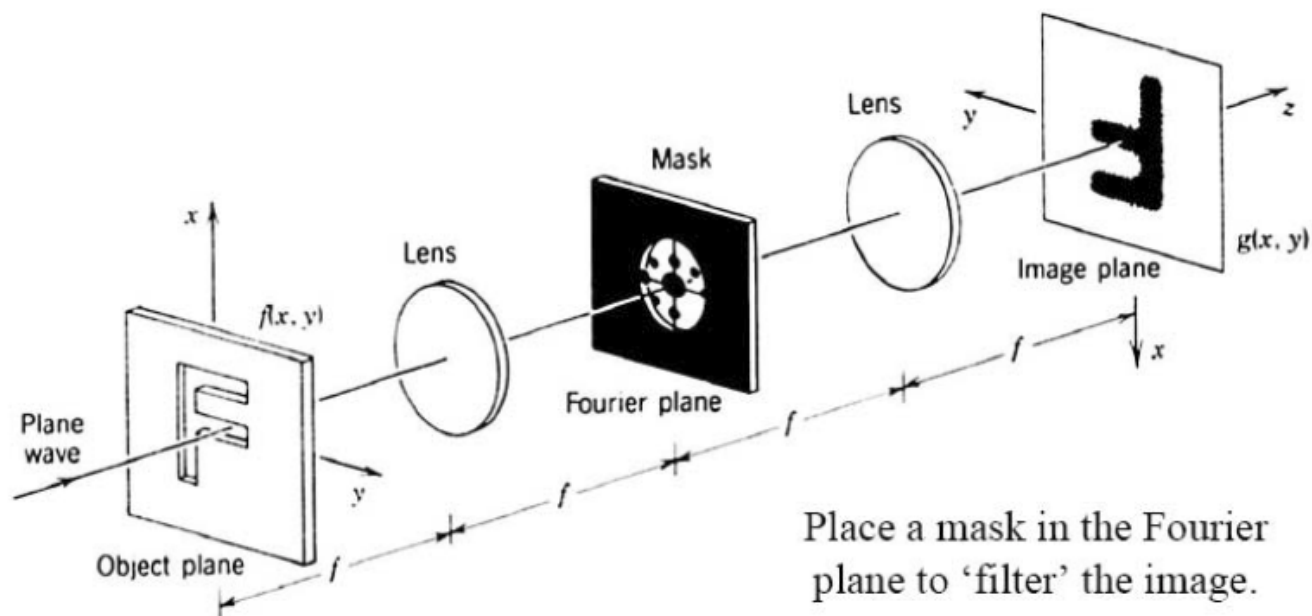
在透镜的像方焦面 F' (傅氏面)上，反应了物信息的全部空间频谱信息，因此，可以在 F' 这一频谱面上，安置不同结构的光阑，用于提取或摒弃某些频谱（选频），从而改变原物频谱，以完成图像信息的处理（改变像）。

5.4.2 空间滤波实验

空间滤波

空间滤波器

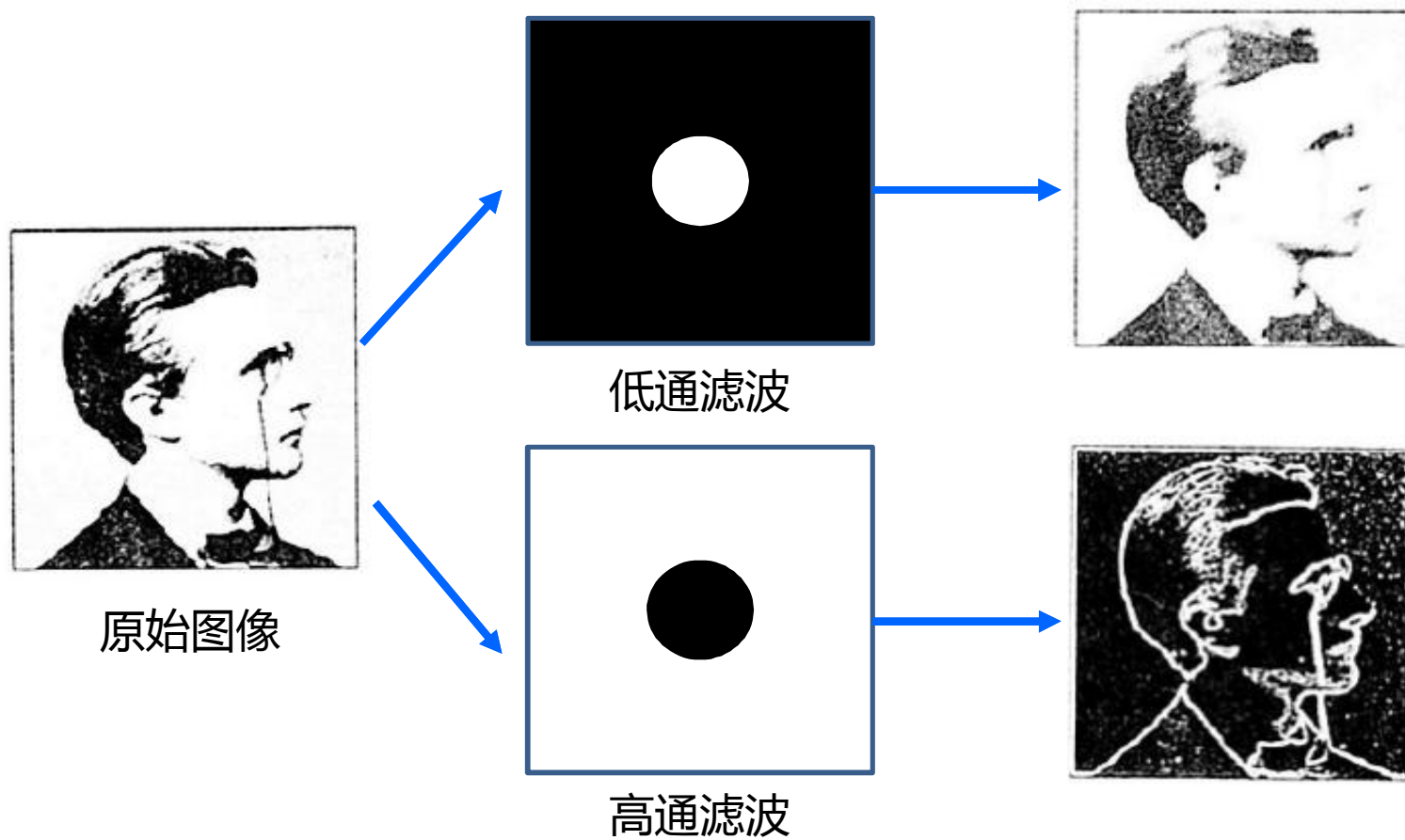
能够改变光信息空间频谱的器件，都被称为光学滤波器，或常被称为空间滤波器（spatial filter）。空间滤波器也有振幅型、相位型、以及相幅型之分。



图片选自Fundamentals of Photonics, Saleh & Teich

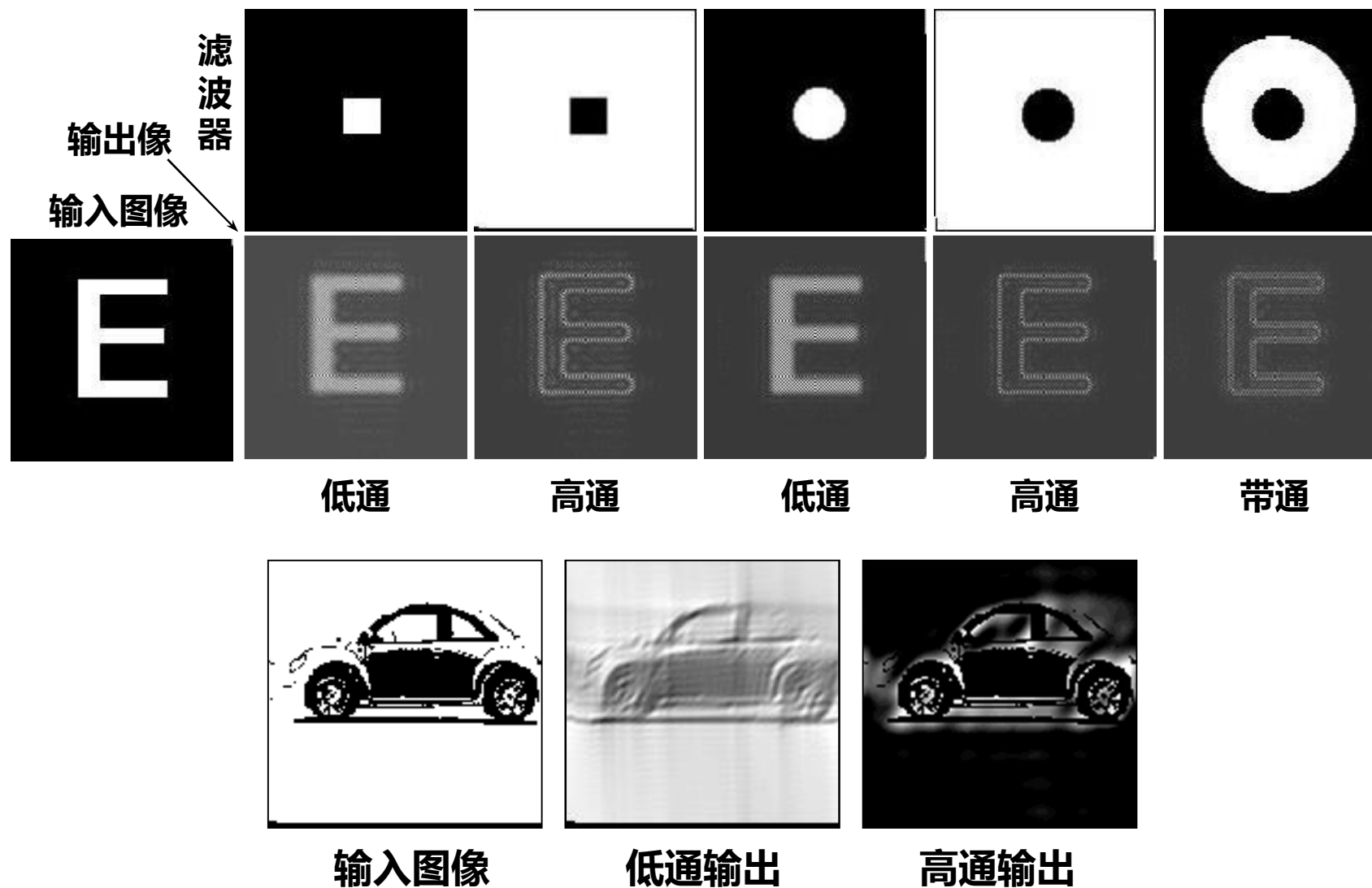
5.4.2 空间滤波实验

空间滤波的实例



5.4.2 空间滤波实验

空间滤波的仿真结果



5.4.2 空间滤波实验

典型的空间滤波

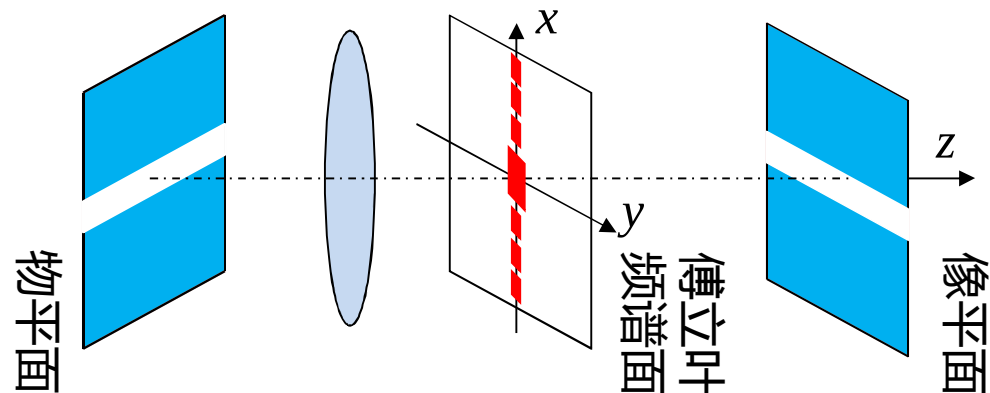
特征

- y 方向单缝的衍射斑是 x 方向分布的一系列点
- x 方向单缝的衍射斑是 y 方向分布的一系列点

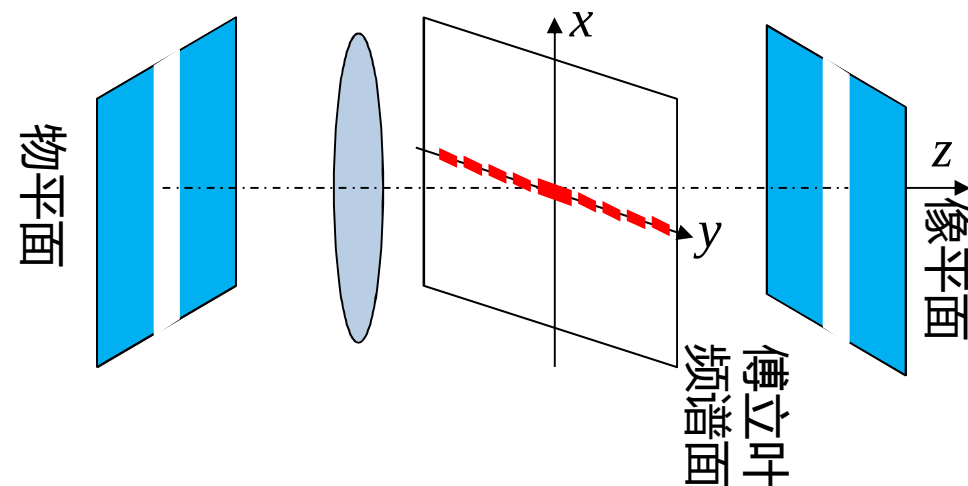
原因分析（以竖直方向为例）

- 相干光源（即傅氏面上的衍射斑）具有沿 y 方向分布的相位差，因而在 y 方向进行相干叠加，形成具有 y 分布的干涉条纹；
- 没有沿 x 方向部分的相位差，因而在 x 方向均匀照明占主导因素，干涉条件难以满足。所以干涉条纹仅具有沿 y 方向的强度差异。

水平狭缝的傅氏面频谱及其像



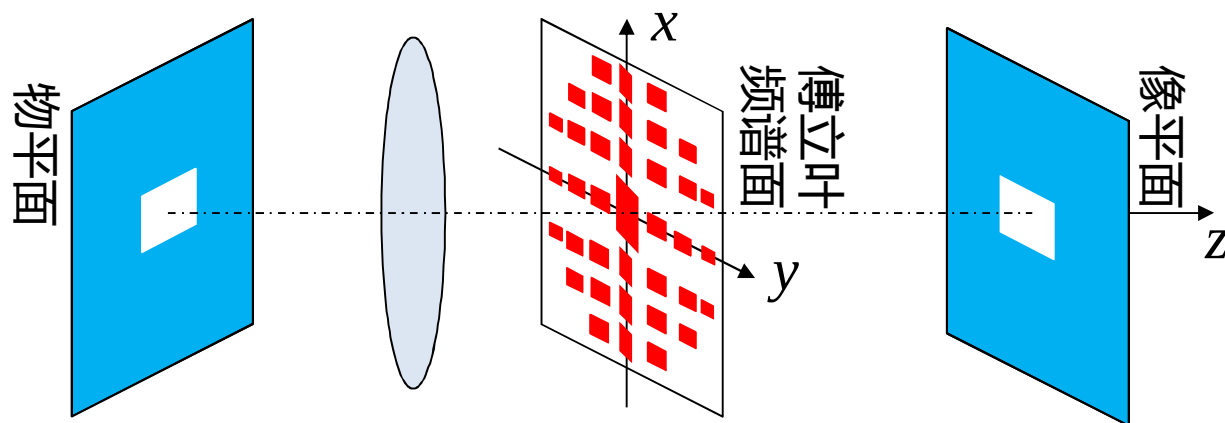
竖直狭缝的傅氏面频谱及其像



5.4.2 空间滤波实验

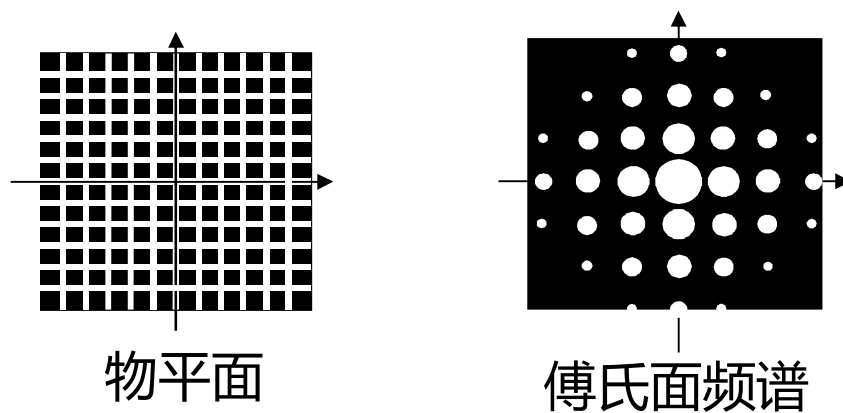
典型的空间滤波

矩形孔的傅氏面频谱及其像



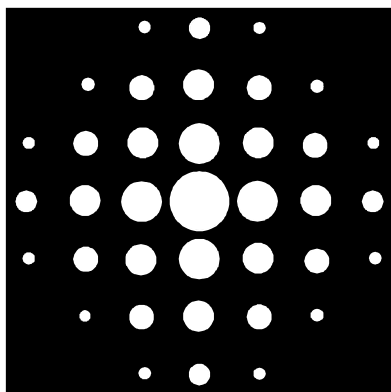
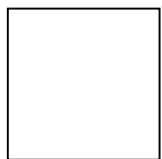
相干光源具有二维分布的相位差，因而干涉形成具有二维强度分布的干涉花样。

网格的傅氏面频谱

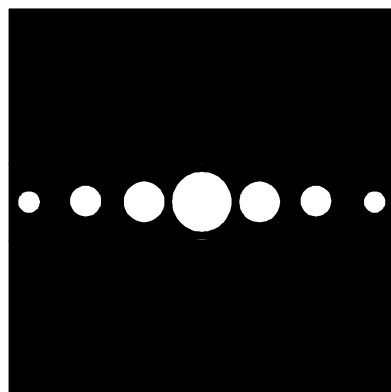


5.4.2 空间滤波实验

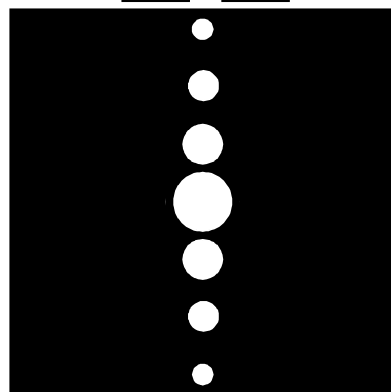
空间滤波实验（网格滤波）



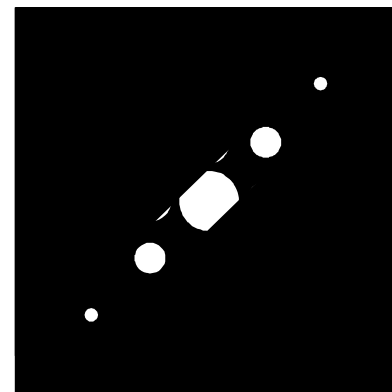
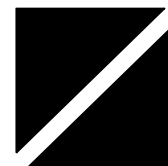
无空间滤波装置



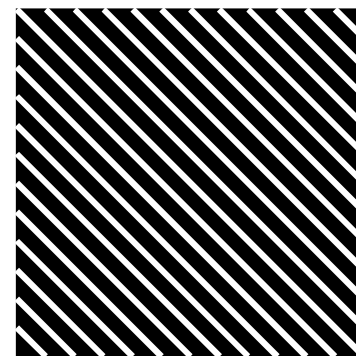
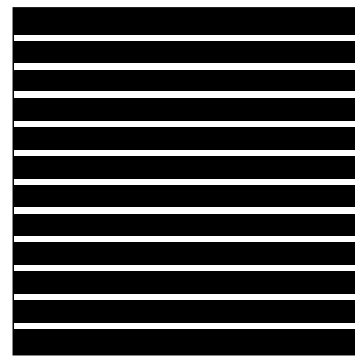
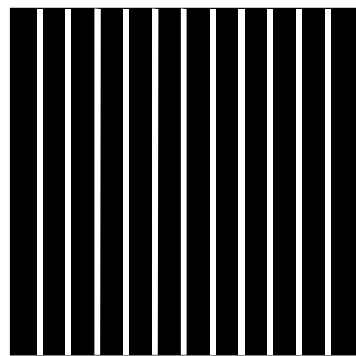
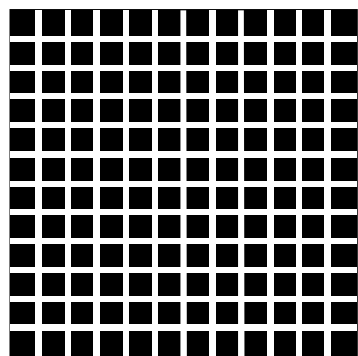
水平带通滤波装置



竖直带通滤波装置



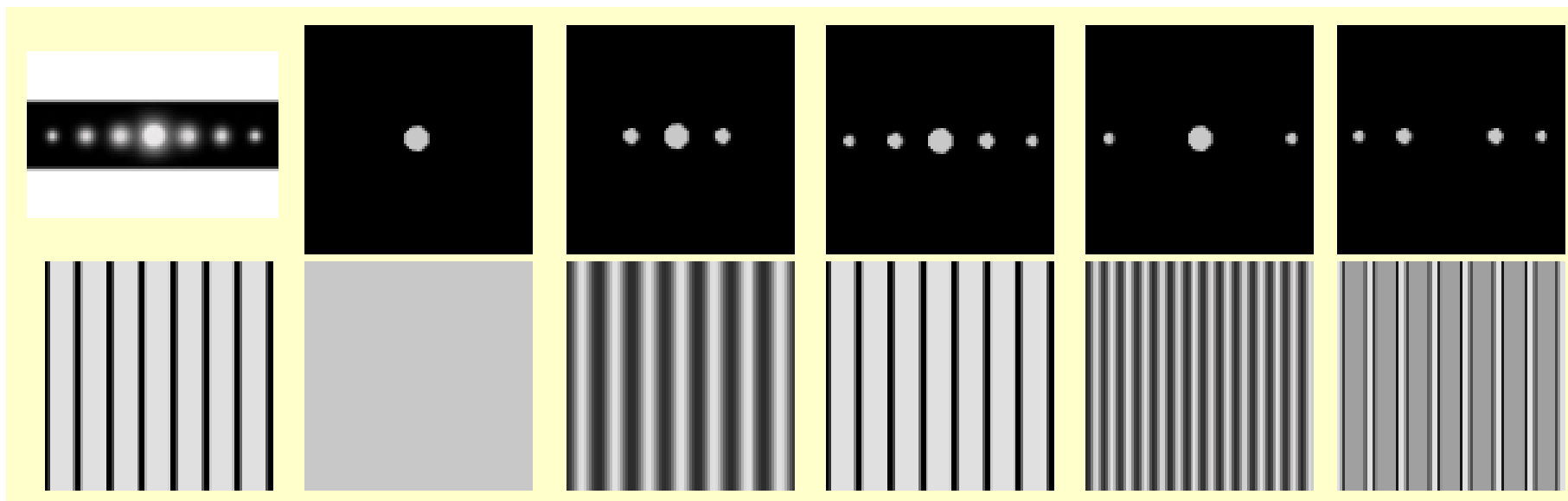
倾斜带通滤波装置



傅氏面空间滤波后像平面光强分布

5.4.2 空间滤波实验

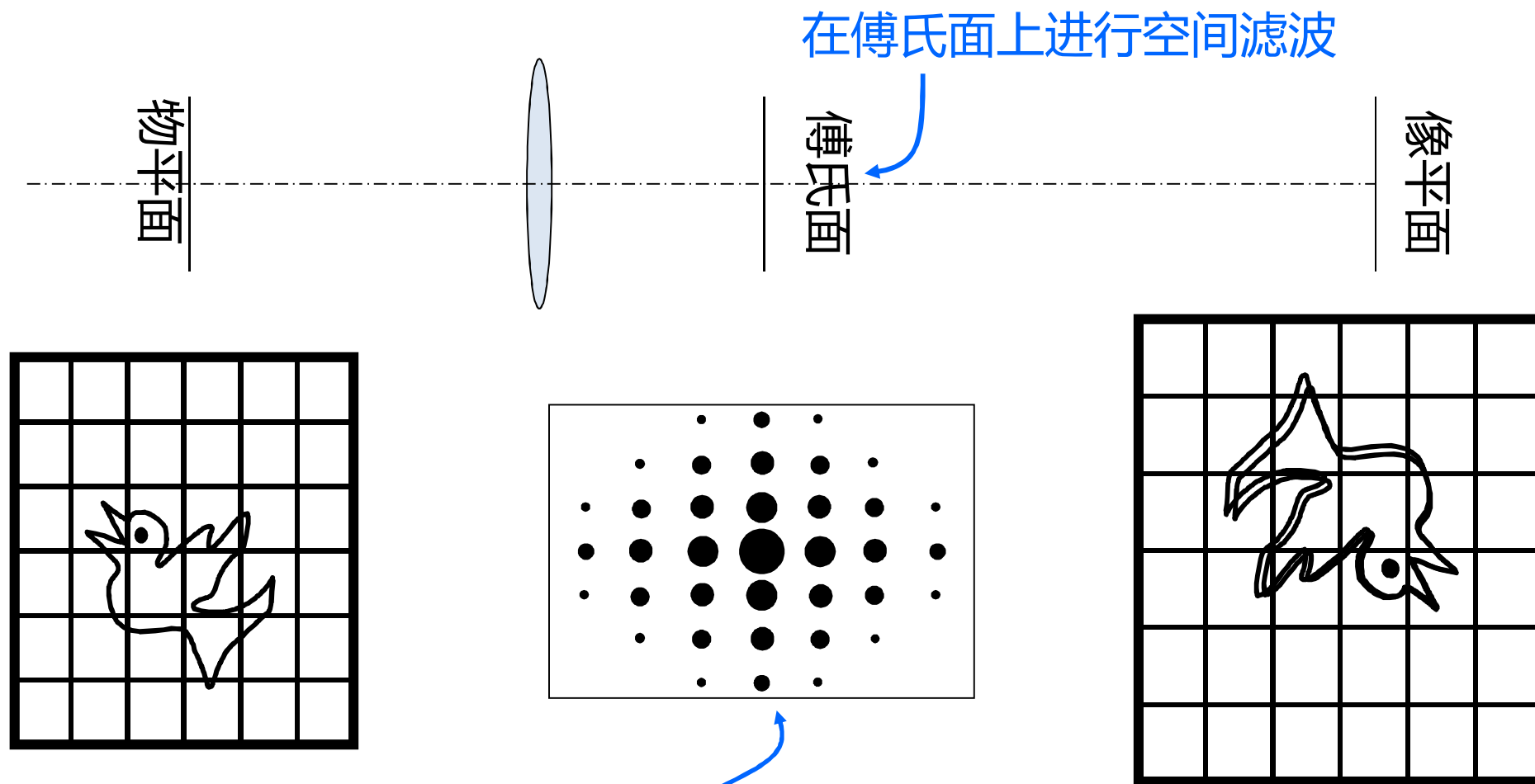
空间滤波实验（频谱选择）



有选择地使频谱面上部分衍射斑通过，可以得到不同的图像。

5.4.3 相干光学图像处理系统

一个图像处理的实例



- 只让焦平面上的亮点透过→像平面上出现清洁的光栅图形--其它图形滤掉。
- 挡住焦平面上的亮点→在像平面上出现消除了光栅线条的图形。

5.4.3 相干光学图像处理系统

严格傅里叶变换的条件

夫琅禾费衍射场的基本形式可以写作

$$U(x', y') = CA_1 e^{i\varphi(x', y')} F\{\tilde{t}(x, y)\}$$

若一次衍射后直接接受衍射场（一次衍射），则可以忽略 $\varphi(x', y')$ 。

$$I(x', y') = \tilde{U}(x', y') \tilde{U}^*(x', y') = C^2 A_1^2 F\{\tilde{t}(x, y)\} F^*\{\tilde{t}(x, y)\}$$

但若存在二次衍射，则傅氏面上的位相分布 $\varphi(x', y')$ 影响相干叠加的结果。

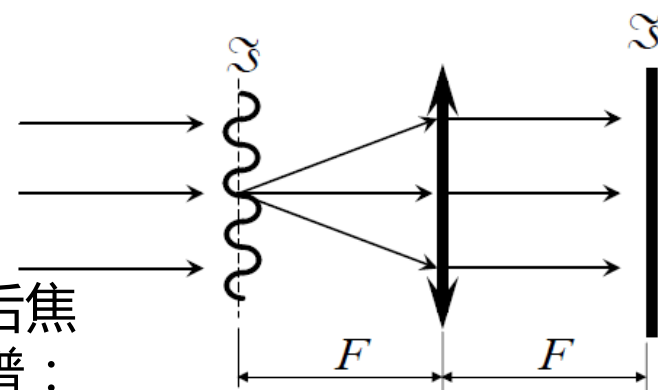
等光程光路设计，使衍射屏中心到达不同场点的衍射线等光程。

$$\varphi(x', y') = kL_0(x', y') = \text{const}$$

解决办法：衍射屏置于透镜的前焦面上。此时后焦面的复振幅分布准确的成为屏函数的傅里叶频谱：

$$U(x', y') = F\{\tilde{t}(x, y)\}$$

衍射屏的空间频率与场点坐标的对应关系为 $(f_x, f_y) = \frac{k}{2\pi F}(x', y') = \frac{1}{\lambda F}(x', y')$

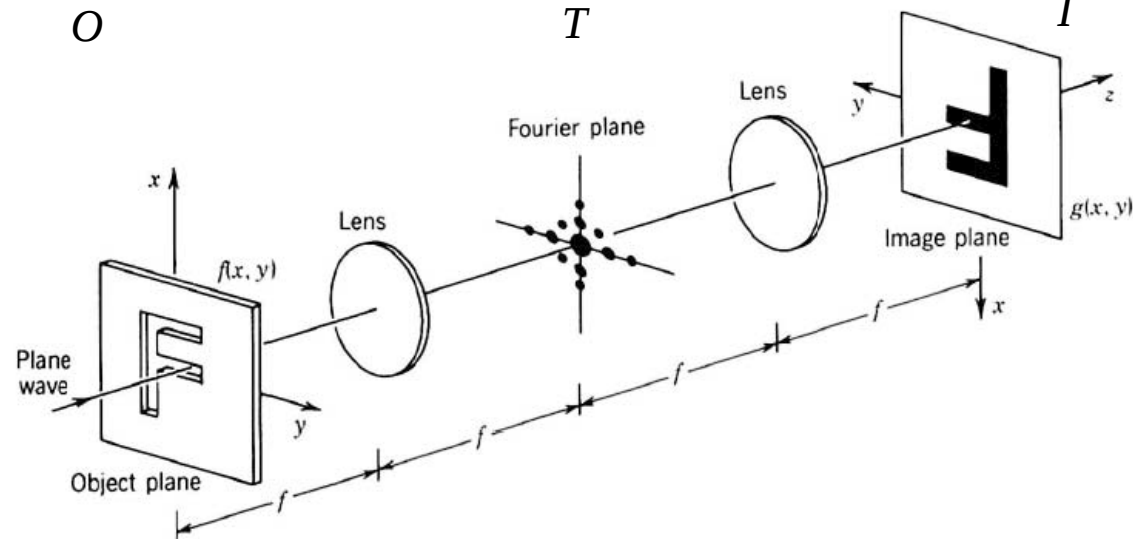
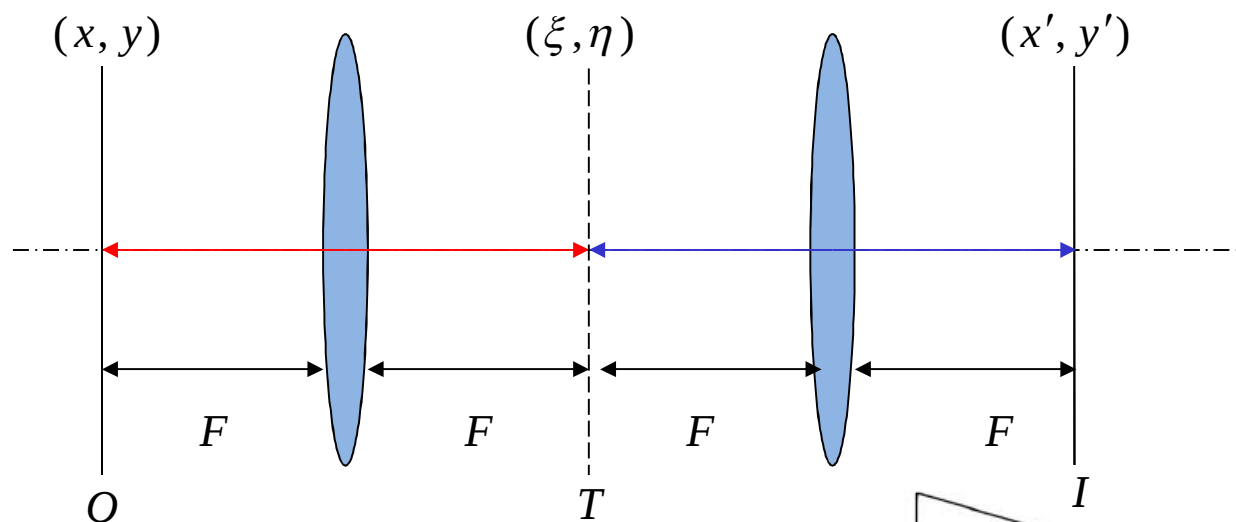


5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统

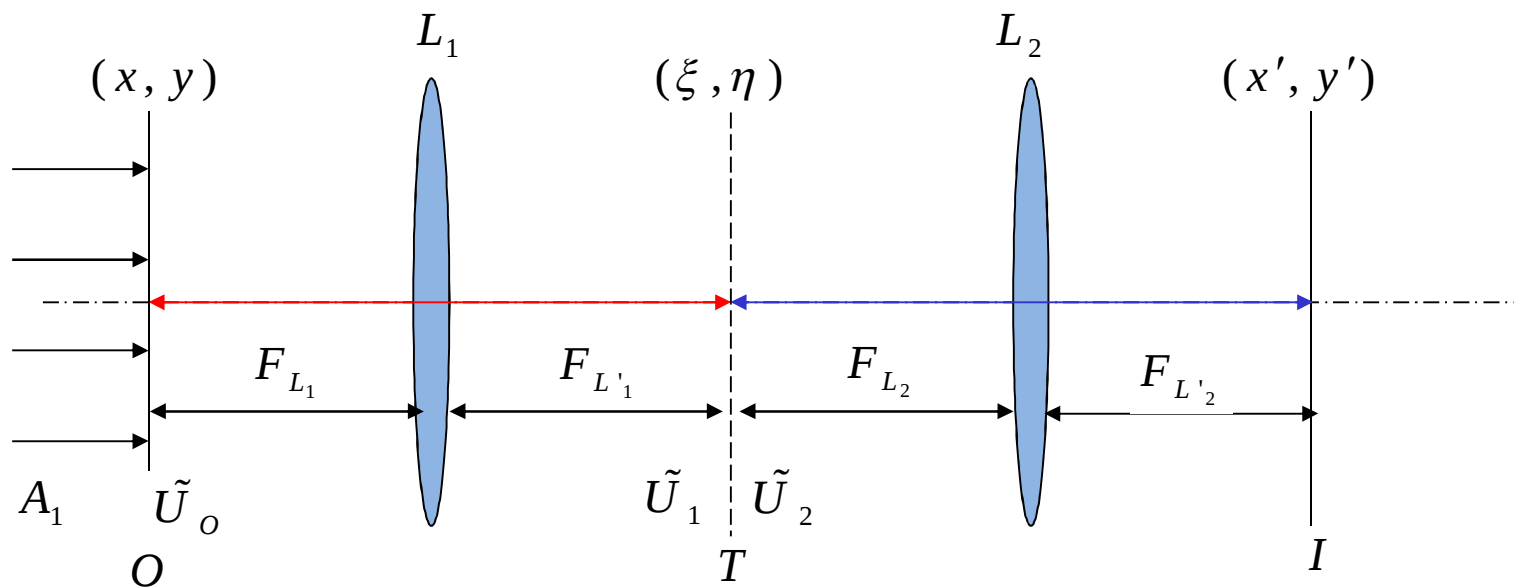
物平面O，变换平面T，像平面I：OTI系统

两个透镜的
共焦组合



5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述



(1) 物场经过透镜的频谱

$$\tilde{U}_1(\xi, \eta) = F \{ \tilde{U}_O(x, y) \}$$

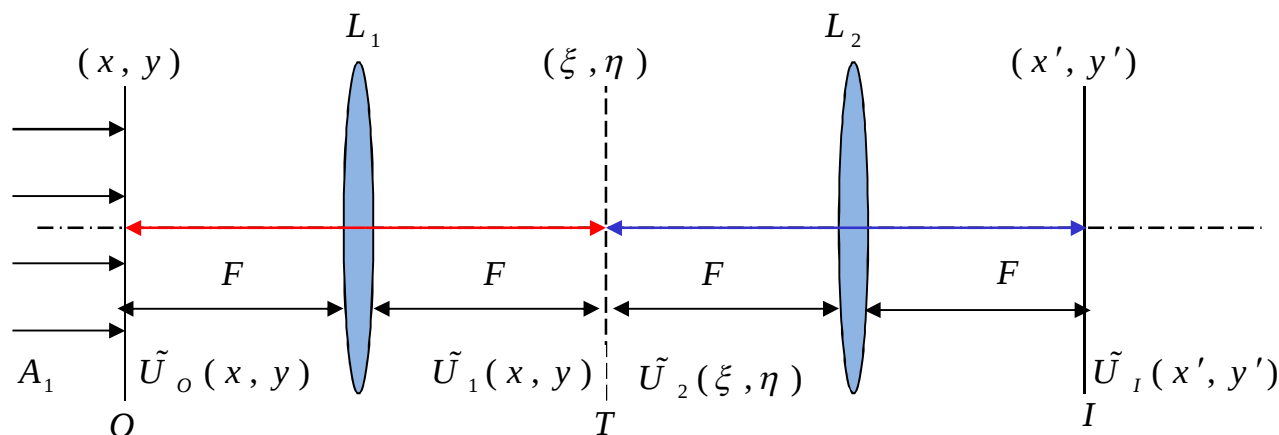
(ξ, η) — 变换平面上的线坐标

$\{q_x, q_y\}$ — 物平面上的空间频率

$$(\xi, \eta) = \{F \lambda f_x, F \lambda f_y\}$$

5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述（续）



(2) 从 T 面出射光场的频谱

$$\tilde{U}_2(\xi, \eta) = T(\xi, \eta) \cdot \tilde{U}_1(\xi, \eta)$$

(3) 透镜 L_2 对频谱的变换

$$\tilde{U}_I(x', y') = F \{ \tilde{U}_2(\xi, \eta) \}$$

(x', y') 与变换平面上的空间频率 (f_ξ, f_η) 的关系

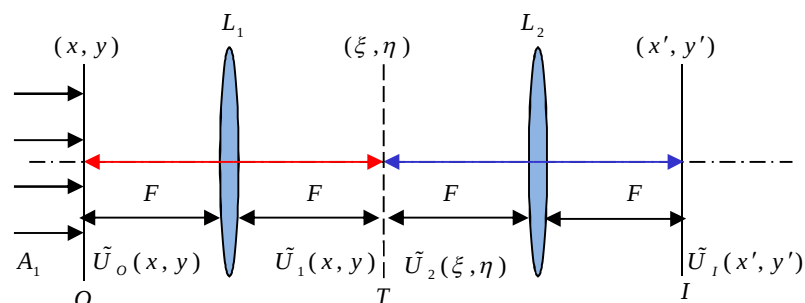
$$(x', y') = \{ F \lambda f_\xi, F \lambda f_\eta \}$$

5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述（续）

（4）总体考虑，输出像场的表示为

$$\tilde{U}_I(x', y') = F \{ T(\xi, \eta) \cdot F \{ \tilde{U}_O(x, y) \} \}$$



特殊情况下，当滤波函数 $T(\xi, \eta) = 1$ 时，输出像场为

$$\begin{aligned} \tilde{U}_I(x', y') &= FF \{ \tilde{U}_O(x, y) \} = \tilde{U}_O(-x, -y) \\ (x', y') &= (-x, -y) \end{aligned}$$

说明：

- ① 对一个函数连续做两次傅里叶变换，其结果形式与原函数相同，但变量坐标反转，即相当于横向放大率 $V = -1$ 。
- ② 4F系统是一个以倒置形式重现物的成像系统，也是对一个函数进行两次傅里叶变换的光学实现。

5.4.3 相干光学图像处理系统

4F系统波前变换的数学描述（续）

(5) 相干光学传递函数OTF
(Optical Transfer Function)

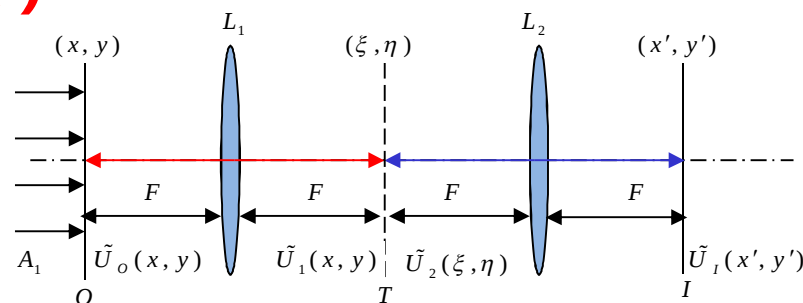
$$\text{OTF} = \frac{F \{ \tilde{U}_I \}}{F \{ \tilde{U}_O \}}$$

$$\text{OTF} = \frac{F \{ \tilde{U}_I \}}{F \{ \tilde{U}_O \}} = \frac{F \{ \tilde{U}'_O \}}{F \{ \tilde{U}_O \}} = \frac{\tilde{T} \cdot \tilde{U}_1}{F \{ \tilde{U}_O \}} = \frac{\tilde{T} \cdot F \{ \tilde{U}_O \}}{F \{ \tilde{U}_O \}} = \tilde{T}$$

这一结论表明：滤波函数 $T(\xi, \eta)$ 就是4F系统的OTF，这一重要结论为人们设计光学滤波器、以及实现光学图像处理，提供了理论指导。

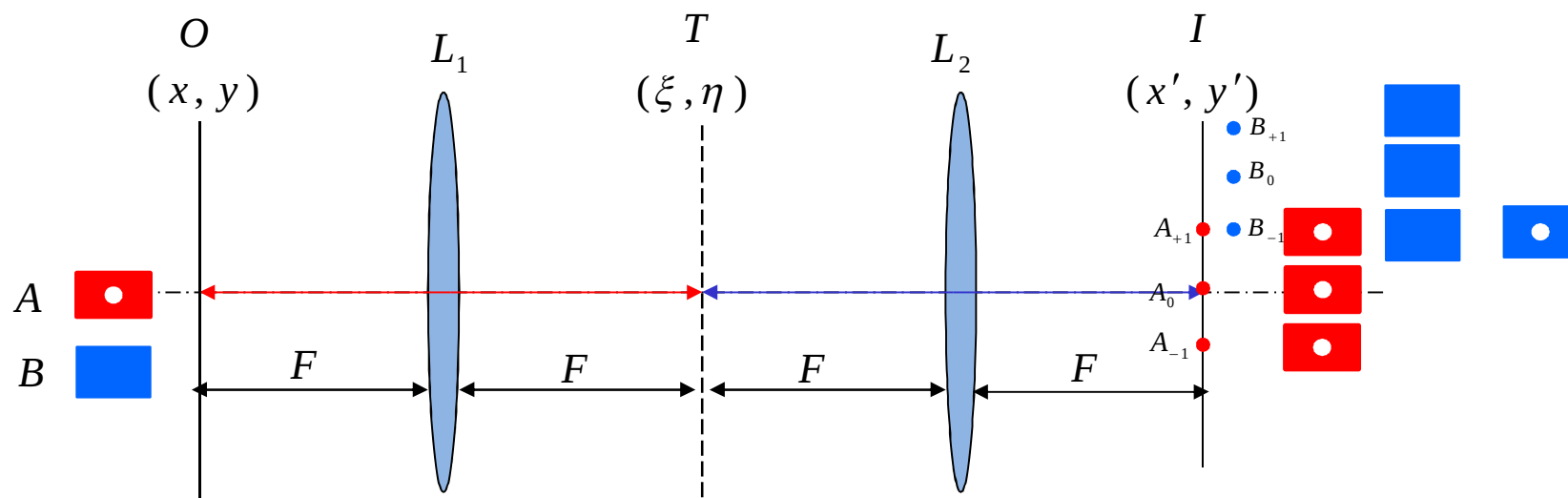
说明

- (1) 对于4F系统来说，前后透镜 L_1 和 L_2 的焦距相等不是必要条件。
- (2) 前后两个透镜的共焦组合是必要条件，这保证了前后两次波前变换，均为纯净的傅里叶变换。
- (3) 一个透镜的前后两个焦面是一对傅里叶变换面，但并非物像共轭面。

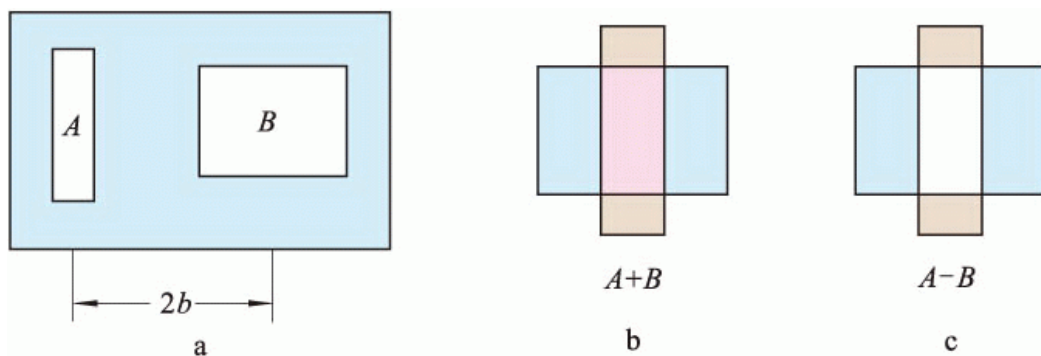


5.4.4 图像的加减与微分

图像的加减



图像加减装置原理图



图像加减原理



图像相加的实验结果

5.4.4 图像的加减与微分

图像的加减(续)

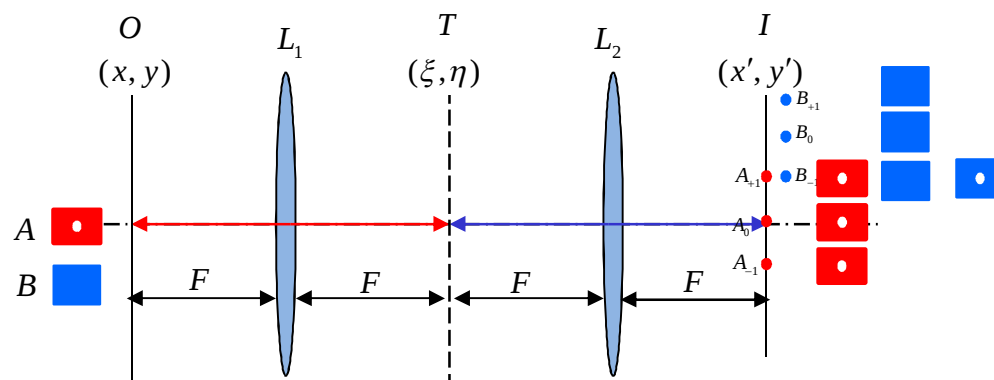
两幅图像的透过率函数分别为 $\tilde{t}_A$ 和 $\tilde{t}_B$

实现图像**相乘**的方法—两幅图像相叠

实现图像**相加**的方法

— $4F$ 系统 + 变换面使用正弦光栅

$$T(\xi, \eta) = t_0 + t_1 \cos(2\pi f_0 \xi + \varphi_0)$$

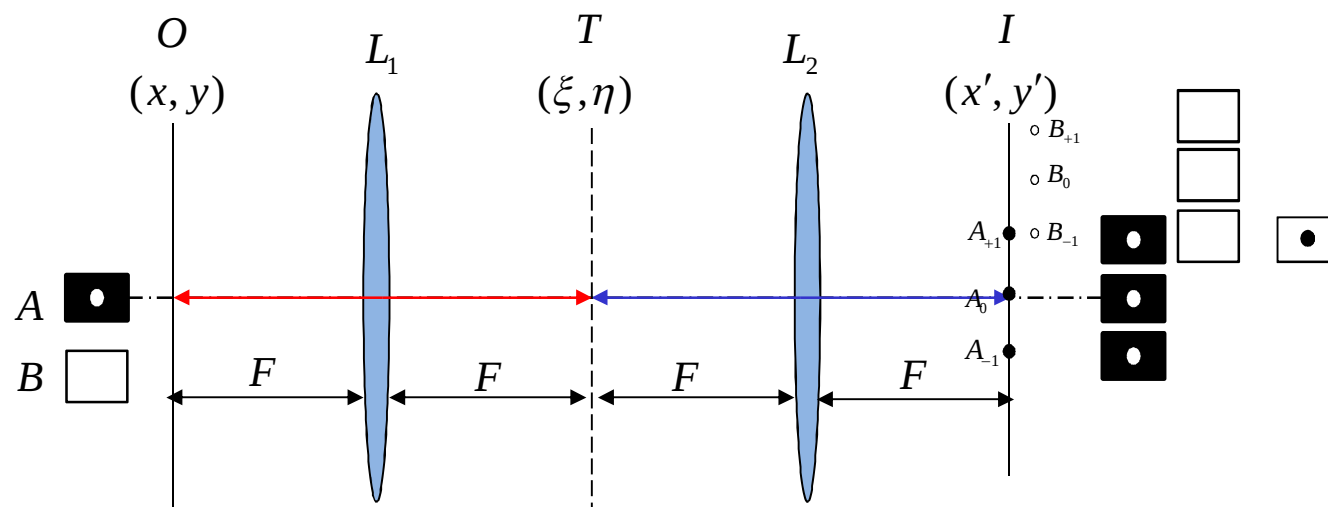


原理

- (1) 正弦光栅使物 A 和 B 分别在像面上出现三幅图像，分别为 (A'_{+1}, A'_0, A'_{-1}) 和 (B'_{+1}, B'_0, B'_{-1}) 。
- (2) 调节物面上 A 和 B 的距离，使图像 A'_{+1} 和 B'_{-1} 在空间位置上重合。
- (3) 精细位移正弦光栅滤波器，连续改变图像 A'_{+1} 和 B'_{-1} 之间的位相差 δ 。
- (4) 当 $\delta=0, 2\pi\ldots$ 时，实现图像相加； $\delta=\pi, 3\pi\ldots$ 时，实现图像相减。

5.4.4 图像的加减与微分

图像的加减(续)



滤波器定位实验

- (1) 采用一个黑色矩形中开一透光小孔的物 A ，以及一个全通光的矩孔 B ，作为两个物（采用最简单的图像作为试片）。
- (2) 调节 A 、 B 的位置，使像 A'_{+1} 和 B'_{-1} 重合。
- (3) 精细调节正弦光栅滤波器，当相面上出现一个最黑的圆斑，且周围是一片亮场时，停止移动（表明滤波器位置使 A'_{+1} 和 B'_{-1} 之间的相位差满足 π 条件，因此反衬度翻转）。
- (4) 在进行两张实际图像加减处理时，要严格保持滤波器的位置不动。

5.4.4 图像的加减与微分

图像的加减(续)

说明

(1) **应用**：光学加减法可以凸显两张图像之间的细微差别，在遥感、医疗、产品检验等方面有广泛应用。

(2) **一对三特性**：在正弦光栅滤波器的作用下， $4F$ 系统的输入与输出之间，不再是点一点对应的关系，而是一点物点对应三点像点。由点及面，一副图像对应三幅输出图像，分别为零级和正负一级。

(3) **图像间隔**：如果以图像中心点来标定图像位置，则物平面两幅图像的位置分别为 $x(A)=0$ ， $x(B)=-a$ 。此时，由于正弦光栅的衍射特性，像平面上两组图像的位置分别为：

$$\begin{cases} x'(A_0)=0 \\ x'(A_{+1})=f_0\lambda F \\ x'(A_{-1})=-f_0\lambda F \end{cases} \begin{cases} x'(B_0)=a \\ x'(B_{+1})=f_0\lambda F+a \\ x'(B_{-1})=-f_0\lambda F+a \end{cases} \begin{aligned} &A_{+1} \text{ 和 } B_{-1} \text{ 重合, 意味着 } x'(A_{+1})=x'(B_{-1}) \text{ 即 } f_0\lambda F=-f_0\lambda F+a \\ &\Rightarrow \text{两图像的合适间隔为 } a_0=2f_0\lambda F \end{aligned}$$

这也是每幅图像能允许的最大尺寸 (x 方向)

(4) **位移量与相移量**：

衍射屏的位移会导致夫琅禾费衍射场的相移，但不改变衍射图像的位置。根据位移量 $\Delta\xi$ 与相移量 $\Delta\varphi$ 之间的关系 $\Delta\varphi=-k\sin\theta\Delta\xi$ 可以得到，当+1级与-1级图像满足相位差为 π 时，有

$$\text{特征位移量 } \Delta\xi_0 = \frac{1}{4f_0} = \frac{d_0}{4} \quad d_0 - \text{光栅周期}$$

5.4.4 图像的加减与微分

图像的加减(续)

例题：

有一正弦光栅，其空间频率为 $f_0=50\text{mm}^{-1}$ ， $4F$ 系统中选用的透镜焦距为 $F\approx 200\text{mm}$ ，入射光波长 $\lambda\approx 600\text{nm}$ ，请估算待处理图像的间隔和滤波器的特征位移量。此时，机械传动系统的位移精度是多少？

解：待处理图像的间隔和允许的最大宽度均为

$$a_0 = 2 f_0 \lambda F = 2 \times 50 \times 200 \times 600\text{nm} = 12\text{mm}$$

滤波器的特征位移量为

$$\Delta\xi_0 = \frac{1}{4f_0} = \frac{1}{4 \times 50\text{mm}^{-1}} = 5\mu\text{m}$$

这一结果的物理意义在于：位移传动系统的精度要求 $\Delta\xi \ll \Delta\xi_0$

对于本题来说，传动系统的位移精度 $\Delta\xi\approx 1\mu\text{m}$ ，可以看出是一个很高的要求。增大 $\Delta\xi_0$ 需要减小光栅的空间频率 f_0 ，但这会同时减小 a_0 ，使能处理的图片变窄。

5.4.4 图像的加减与微分

图像的微分

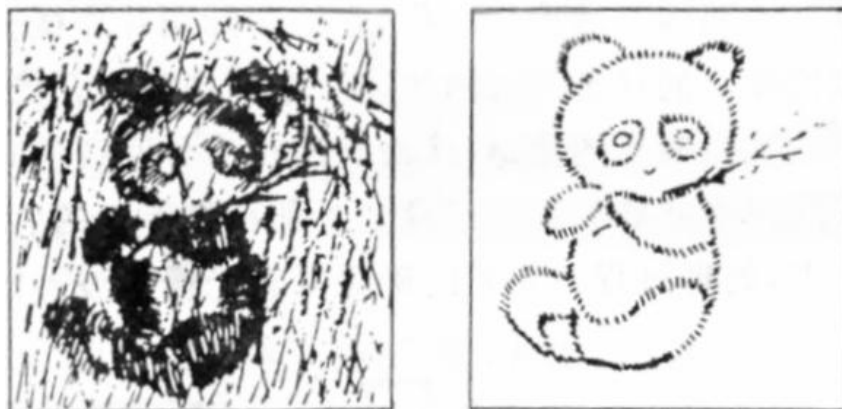
作用：可以增强模糊图像的轮廓，或者使图像内部高反差的部位凸显出来，有助于人们确定或鉴别特征图像。但是微分在增强边缘的同时牺牲了一部分导致视觉柔和的低反差层次。其运算描述为：

$$\Delta \tilde{t} = \tilde{t}(x + \Delta x, y + \Delta y) - \tilde{t}(x, y)$$

两幅图像之间位相差为 π

实现方法：

- (1) 使用复合光栅作为滤波器；
- (2) 进行两幅图像的两步操作：图像微移、相位差调为 π



图像微分产生的边缘增强效果

5.4.4 图像的加减与微分

图像的微分的实现方法

第一步：图像微移

复合光栅包含两种空间频率 f 和 f' ，其差频 $\Delta f = (f - f') \ll f, f'$ 。设其初始位置的滤波函数为

$$\tilde{T}(\xi, \eta) = t_0 + t_1 \cos 2\pi f \xi + t'_1 \cos 2\pi f' \xi$$

像平面共包含5幅图像，以 A_{+1} 和 A'_{+1} 为例，两者包含微小的错位 $\Delta x'$ 。

$$\Delta x' = \lambda F (f' - f) = \lambda F \Delta f$$

允许处理图像的最大尺寸 a_0 ，是避免 A_{+1} 与 A_0 像重叠的距离。

$$a_0 = \lambda f F$$

由于 $\Delta f \ll f$ ，因此 $\Delta x' \ll a_0$ ，可称微小位移。

第二步：相移 π

精细平移复合光栅，位移 $\Delta \xi$ 将引起图像 A_{+1} 和 A'_{+1} 有不同的相移量，分别为

$$\Delta \varphi(A_1) = -2\pi f \Delta \xi \quad \Delta \varphi(A'_1) = -2\pi f' \Delta \xi \quad \Rightarrow \quad \delta = \Delta \varphi(A_1) - \Delta \varphi(A'_1)$$

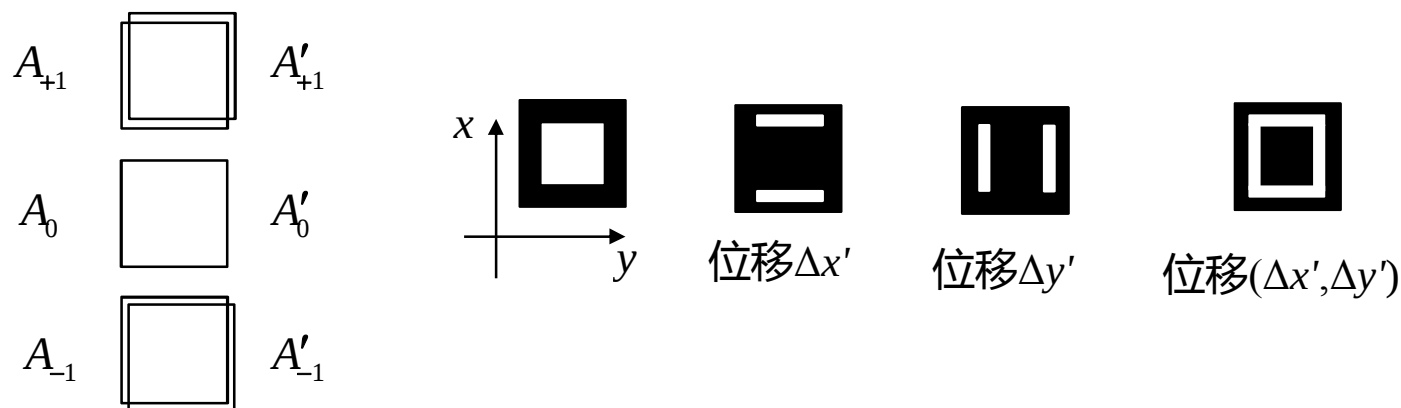
为实现两幅图像相减，令 $\delta = \pi$ ，得到滤波器的特征位移量为：

$$\Delta \xi_0 = \frac{1}{2\Delta f}$$

5.4.4 图像的加减与微分

图像的微分的实现方法(续)

图像微移的滤波器定位实验



(1) 以简单的方孔光阑作为物，在移位滤波器的同时，检测屏幕输出，当像面上出现明锐的边框时，停止位移，此时滤波器的位置已经满足了相位差为 π 的要求。

(2) 处理实际图像时，严格保持光栅滤波器的位置不动。

复合光栅滤波法实现图像微分的缺点

空间铺张和能量浪费：像面上出现的5幅图像中， A_{-1} 和 A'_{-1} 也有微分效果，但无用的零级像 A_0 却占有面积，这将限制图像的尺寸。

5.4.4 图像的加减与微分

图像的微分的实现方法(续)

例题

有一复合正弦光栅，其空间频率为 $q=50\text{mm}^{-1}$ ， $q'=52\text{mm}^{-1}$ ， $4F$ 系统中选用的透镜焦距为 $F\approx 200\text{mm}$ ，入射光波长 $\lambda\approx 600\text{nm}$ ，请估算待处理图像的间隔和滤波器的特征位移量。此时是否满足微分条件？此时，机械传动系统的位移精度要求是多少？

解：

相面上两幅+1级像的位移量为

$$\Delta x = \lambda F \Delta f = 600\text{nm} \times 200 \times (52 - 50) = 0.24\text{mm}$$

因此， x 方向允许的最大图像尺寸为 $a_0 = 50 \times 200 \times 600\text{nm} = 6\text{mm}$

可见 $\Delta x \ll a_0$ 条件满足，因此可以认为是微分运算。

滤波器的特征位移量

$$\Delta \xi_0 = \frac{1}{2\Delta f} = \frac{1}{2(52 - 50)}\text{mm} = 0.25\text{mm} = 250\mu\text{m}$$

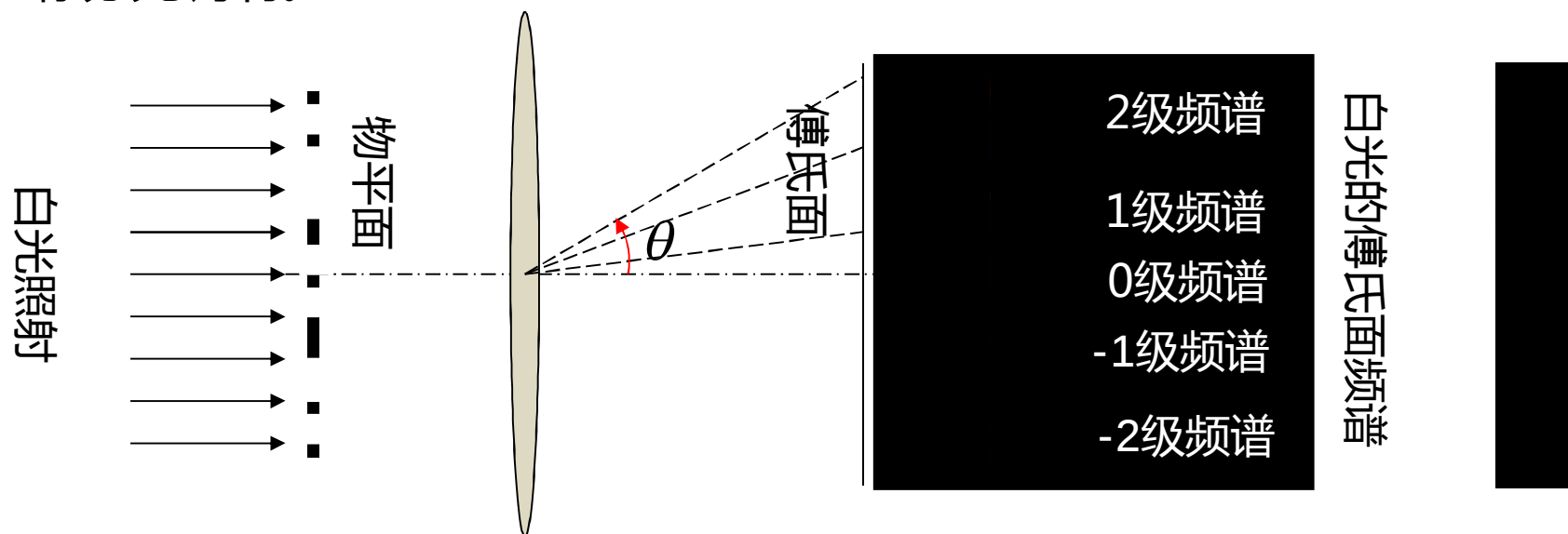
机械传动系统的位移精度 $\delta \xi$ 在 $10\sim 25\mu\text{m}$ 均可满足要求。

5.4.5 图像的色彩处理

显色滤波 (θ 调制)

用白光照射物平面，在傅氏面上，不同波长的同一级频谱的空间位置不同，因此可以通过空间滤波进行色彩选择，从而得到彩色图像，或对图像的色彩进行控制。

这种彩色图像是对不同角度 θ 的光栅产生的光学信息选择的结果，又称分光调制。

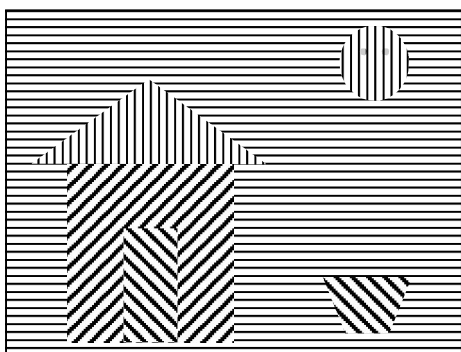
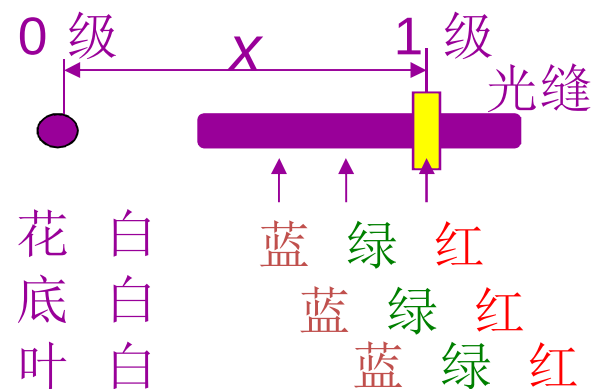


5.4.5 图像的色彩处理

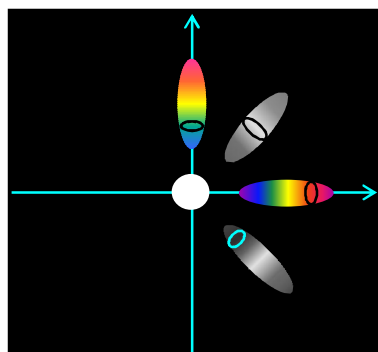
显色滤波 (θ 调制)

原理

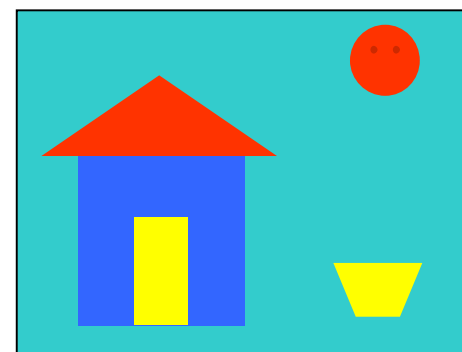
- (1) 拼接光栅在物平面处，白光照射。
- (2) 透光缝开在不同的 θ 角度处，从而使不同波长的频谱通过。
- (3) 在傅氏面上进行 θ 调制，得到彩色光栅图像。



经不同光栅编码后的
图像



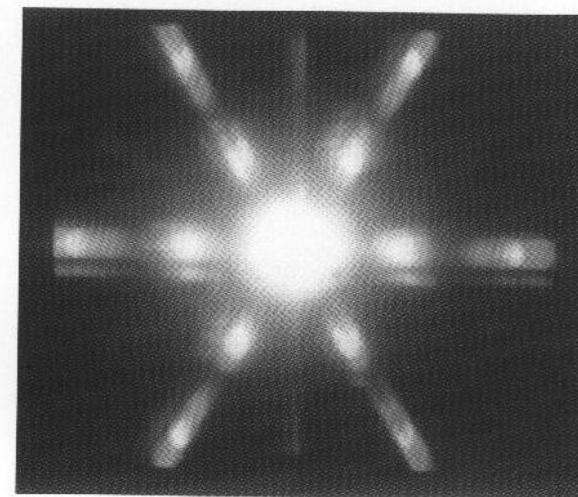
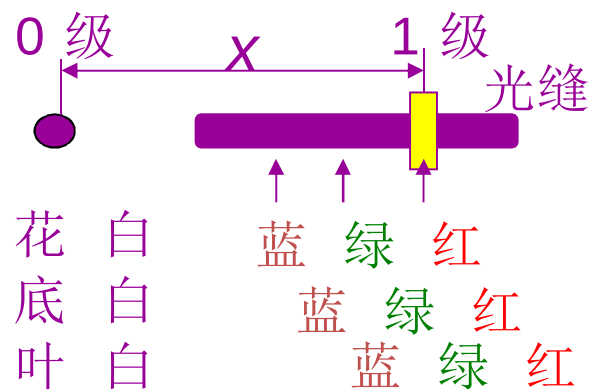
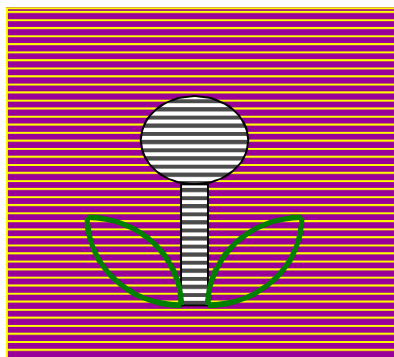
白光照射下编码图
像的频谱



滤波解码编码后的
图像

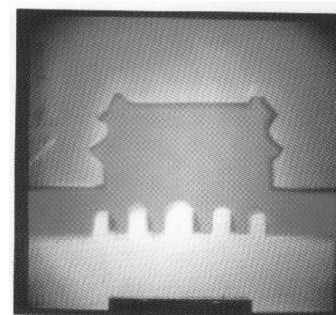
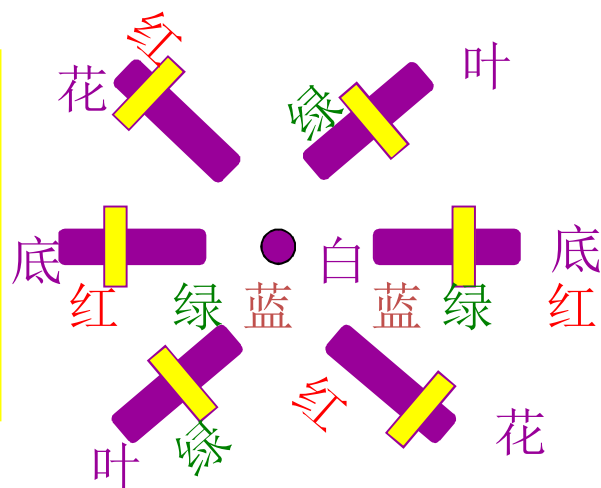
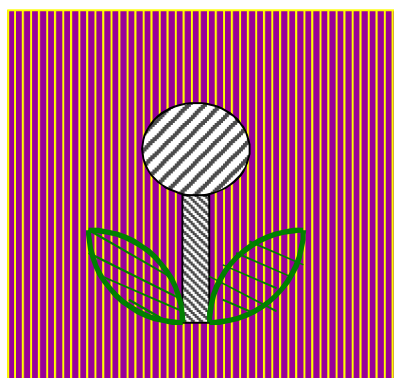
5.4.5 图像的色彩处理

显色滤波 (θ 调制)

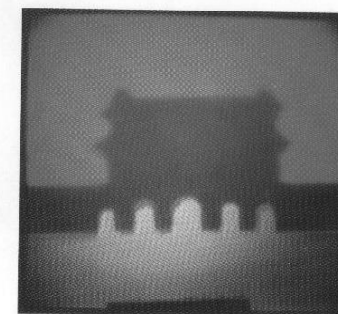


(a) 调制物的频谱照片

θ 调制



(b) 用滤波器获得的输出照片



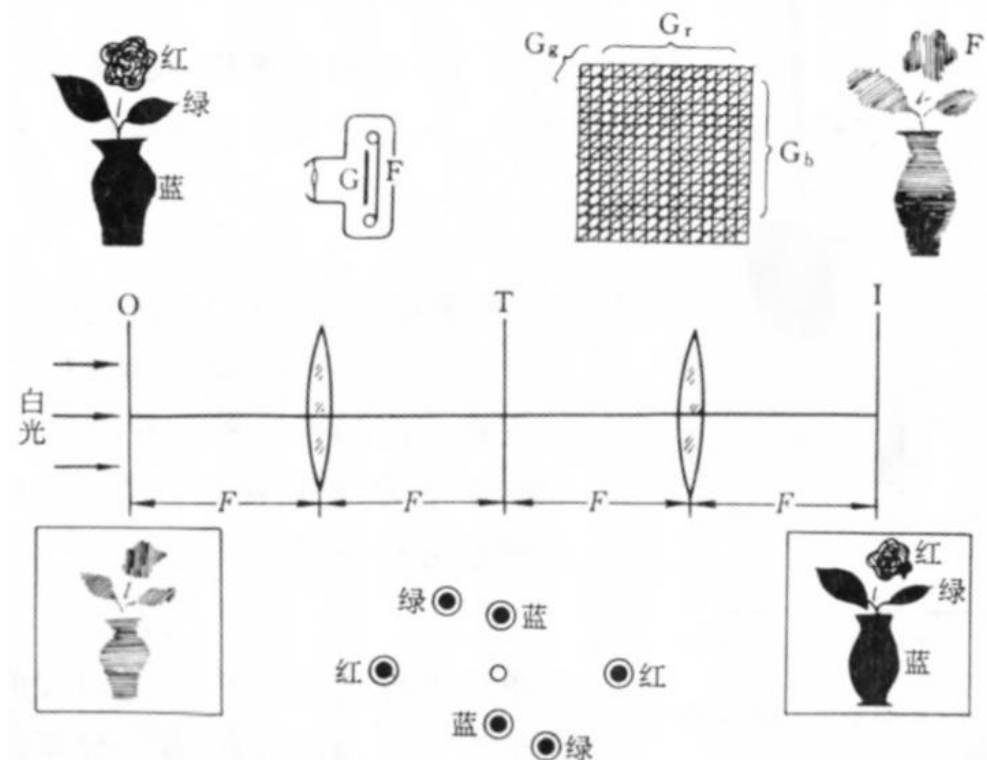
(c) 采用另一种滤波器获得的输出照片

5.4.5 图像的色彩处理

黑白胶卷显示彩色图像

原理

- (1) 在照相底片之前放置一个光栅片(魔片)；
- (2) 光栅片内含有三个不同取向的栅条 G_r , G_g 和 G_b ，分别只允许透过红光、绿光和蓝光。光栅片的设置理论上应符合色度学中的三补色(或三原色)。
- (3) 由此，底片上的不同颜色的部位被“烙印”上不同的取向的栅条。(栅条为黑白)
- (4) 在4F系统中进行与显色滤波相同的操作，事先精确制备的滤波器，放置于变化平面，其开孔位置需要与三元色和三组光栅的取向相匹配。
- (5) 与显色滤波的区别在于这里的光栅取向是由景物的客观色彩而非主观决定。



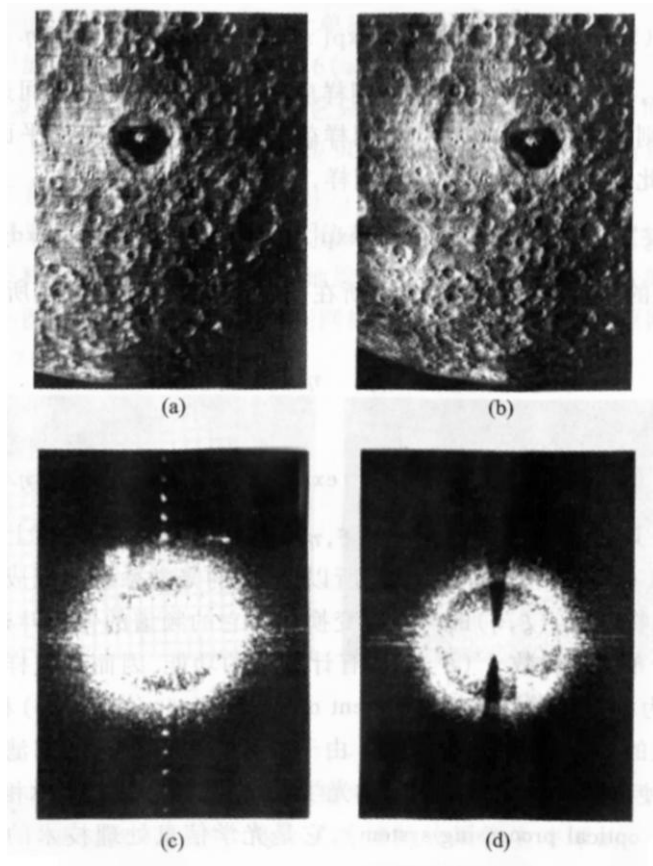
因采用三组取向、三原色的光栅，从图像处理角度可认为是一种调制，因此被称为“**三三制光栅编码原理**”。

5.4.5 图像的色彩处理

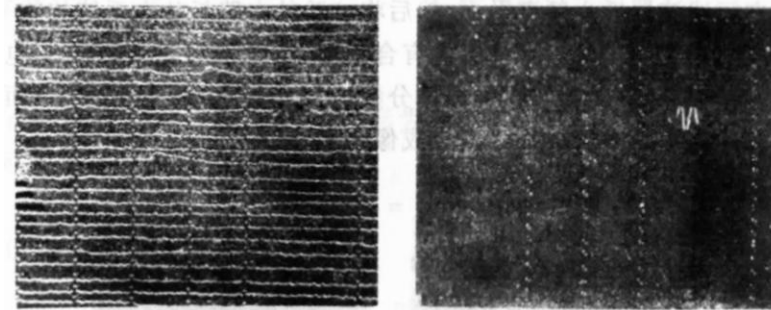


儿时的记忆—贴了彩色膜的黑白电视。虽然是伪彩色，但是很快乐！

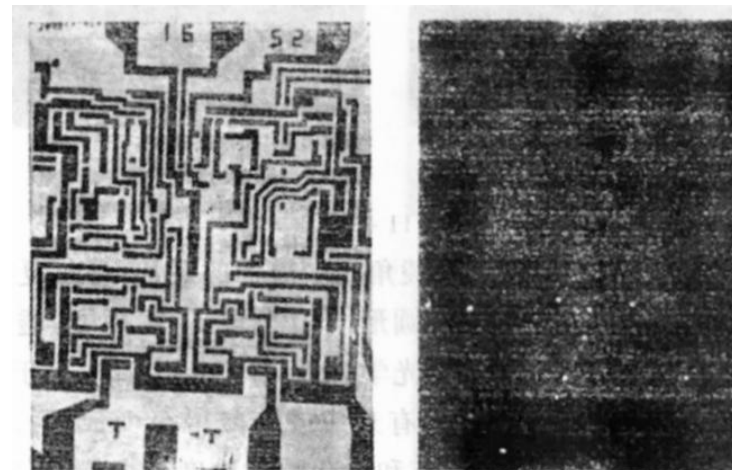
5.4.6 光学图像处理实际应用举例



(a) 信息光学手段处理“月球轨道飞行器1号的照片”



(b) 信息光学手段处理地震波记录仪的数据



(c) 信息光学手段检测大规模集成电路的瑕疵

本节重点

1. 空间滤波的概念（理解）
2. 光学传递函数的作用（理解）
3. 图像的加减、微分（理解）
4. 图像颜色处理的思路和方法（理解）

作业

P127-1,2 (重排p348)