

用相干光学信息处理系统可完成的运算

摘要: 大家知道, 相干光学处理系统能执行如付里叶变换、费涅耳变换和线性空间不变滤波等确实有限种类的运算。最近, 在把这类可完成的运算扩大到一些非线性运算和空间变化线性滤波方面, 已取得了进展。本文回顾过去通常可获得的几个运算, 并且讨论一些较新的技术, 这些新技术能大大地扩充这些可完成运算的种类。

I. 前 言

现代相干光学信息处理的根底, 能追溯到十九世纪末 E·阿贝的工作, 他揭示了用来说明在显微镜中迂到的分辨率极限的理论。这个理论, 由阿贝和波特(Porter)两人在空间滤波实验中戏剧性地证实了。空间滤波的一个最早和最重要的应用, 是获得诺贝尔奖金的 E·泽尼克(F.Zernike)在一九三五年发明的相位对比显微镜。在五十年代, 把相干光学技术运用到更一般的数据处理问题的可能性开始受到重视。在法国, A·麦尔夏和它的同事证明了: 相干光学方法能用来复原模糊照片的对比和分辨率。在美国, E·L·奥奈尔应用相干光学技术探测和抽取在噪音中的信号, L·卡特罗纳和他的同事开始研究把相干光学应用于侧视雷达数据成像。这些进展与利思和乌帕特尼克在全息术方面的重要发展、连续波(cw)激光器的商品化和范德·勒格特干涉法制作复滤波器的推广一块, 在六十年代初就导致相干光学信息处理领域成熟起来。

相干光学处理系统的潜在能力, 长期以来就是数据处理界可望而不可及的。例如, 以基本上用光传播仅几呎远限定的时间, 完成 3000×3000 单元阵列的付里叶变换, 理论上用相干光学系统是可能的。遗憾的是, 许多实际问题妨碍了具有这样快速的光学处理器的实现。这些问题主要是: 以光学系统固有处理速度相当的速度写入输入数据和读出

或记录输出数据的困难。然而, 既使以较慢处理速度的相干光学处理器也有相当好的能力。例如, 以电视分幅率 1000×1000 基元阵列的付里叶变换, 看来似乎是一个很有益的处理能力, 并且用目前的工艺是能达到的。

给出了可以达到的有效数据处理速率, 为什么相干光学信息处理系统没有获得广泛地运用呢? 对于任一给定的数据处理问题, 可存在一系列的特殊理由, 说明为什么光学处理对解决那个问题不是最好的工艺。两个普通的缺陷是: 1) 因为光学处理器是模拟计算机, 在输出处可达到的精度远比数字处理机低; 2) 光学处理器是很不灵活的计算机, 它仅适合于有限种类的处理运算。这两个缺陷基本上是合适的。除非改变它对所完成的运算类型的重要依赖关系。

关于第一个缺陷, 亦即低的精度, 应该注意的是, 有许多数据处理问题, 对于它们来说这个性质不是严格限制。尤其是这样一种情况, 当从处理器的输出是为人眼观测的一个像时, 人眼具有有限区别灰度层次的本领。此外, 产生简单易读出的一些运算, 的确不硬性要求高的计算精度, 例如, 对几个十分不同的物体外形加以区别的匹配滤波运算。

再看第二个缺陷, 缺乏灵活性, 千真万确能够看出许多数据处理运算, 相干光学系统按它的传统方式执行已是不可能的。例证一般放到非线性运算类型中(请看IV下分), 或放到线性空间变化运算类型中(请看V下分)。本文的主要目的是唤起对正在排除这些

限制的一些新近的和流行的工作的注意。

在下面的材料中，我们首先描述一些相干光学处理器按其传统形式能执行的各种运算。然后把注意力转到某些仍在发展的较新近的工作，目的在于用这些特殊技巧去扩大相干光学处理器的能力，做以前未能完成的运算。

II. 费涅耳和付里叶变换

相干光学处理系统本身最适于作的数据处理运算，无疑是费涅耳和付里叶变换。在下面两小节中我们说明这些运算的每一个，并且说明在相干光学方面它们是如何产生的。

A 费涅耳变换

一个(可为复值)函数 $g(x, y)$ 的费涅耳变换可以定义为:

$$G_a(v_x, v_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[ja(x^2 + y^2)] \cdot \exp[-j2\pi(xv_x + yv_y)] dx dy \quad (1)$$

显然费涅耳变换和 $g(x, y) \exp[ja(x^2 + y^2)]$ 的付里叶变换是等同的，因此，有逆变换关系:

$$g(x, y) = \exp[-ja(x^2 + y^2)] \iint_{-\infty}^{\infty} G_a(v_x, v_y) \cdot \exp[+j2\pi(xv_x + yv_y)] dv_x dv_y \quad (2)$$

当参量 a 等于另时，则上面费涅耳变换和下面付里叶变换变成相同:

$$G(v_x, v_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy \quad (3)$$

为了说明在光学处理中出现的费涅耳变换的方法，考虑图1所示的简单实验。一均匀、偏振、垂直入射的平面波照明一个平面透明片。紧靠透明片后的场能用复值函数

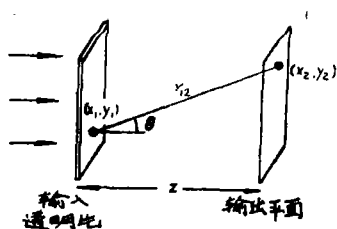


图1 为了求费涅耳变换的光传播几何图形

$U_1(x_1, y_1)$ 描述，它表示在 (x_1, y_1) 各点处透射场 [1] 的相子振幅。这透射场通过下式和入射场 U_0 (此处假设是常数) 及透明片振幅透过率 $t_A(x_1, y_1)$ 相联系:

$$U_1(x_1, y_1) = U_0 t_A(x_1, y_1) \quad (4)$$

为了计算和透明片平行、且置于其后距离 z 处平面上产生的那个场 $U_2(x_2, y_2)$ ，运用惠更斯——费涅耳原理:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{U_1(x_1, y_1)}{r_{12}} \exp(jkr_{12}) \cos\theta dx_1 dy_1 \quad (5)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ (λ 是波长)， r_{12} 是从 (x_1, y_1) 到 (x_2, y_2) 的距离， θ 代表线 r_{12} 和 z 轴正方向 (见图1) 间夹角。

在假设距离 r_{12} 比透明片的实际尺寸和比 (x_2, y_2) 平面中观察区域大得多的条件下，(5)式分母中 r_{12} 可以用 Z 代替， $\cos\theta$ 可用 1 代替，在指数中能做所谓费涅耳近似:

$$r_{12} = \sqrt{Z^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \cong z + \frac{1}{2z} (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2z} (y_2 - y_1)^2 \quad (6)$$

忽略恒定相位因子，场 $U_2(x_2, y_2)$ 表示为:

$$U_2(x_2, y_2) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z}(x_2^2 + y_2^2)\right] / \lambda z \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \cdot \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z}(x_1^2 + y_1^2)\right] \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (7)$$

注(1): 此处及本文其它各处始终，场用标量复函数描述，并做了各种变换不改变源的偏振状态的近似。

在光波长, 仅强度 $I = |U|^2$ 是直接可观察的, 因此在 (x_2, y_2) 平面中, 我们度量的是:

$$I_2(x_2, y_2) = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \left| \iint_{-\infty}^{\infty} t_A(x_1, y_1) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda z}(x_1^2 + y_1^2)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \right|^2 \quad (8)$$

其中运用了(4)式和 $I_0 = |U_0|^2$ 。因此, 除去比例常数, 观察到的强度是输入振幅透过率 $t_A(x_1, y_1)$ 的费涅耳变换的模的平方, 具有参量:

$$a = \pi/\lambda z, v_x = x_2/\lambda z, v_y = y_2/\lambda z, \quad (9)$$

费涅耳变换在许多数据处理问题中起着重大作用, 包括:

1. 连续调频雷达 (chirp radar) 波形的脉冲压缩;
2. 天线阵列, 包括综合阵列的近场聚焦;
3. 对运用带板编码孔径的 x 射线和 γ 射线系统成像;
4. 从所谓费涅耳全息图成像。

虽然列出的这几个应用无疑是不完全的, 但它足以表明费涅耳变换的重要性。两个平面间相干光的简单传播提供一个执行这类运算的方法, 这的确是个幸运的事实。

B 付里叶变换

如图 2 所示, 图 1 系统的简单变更使我们能够履行二维付里叶分析。在这种情况下, 输入透明片用一会聚于 (x_2, y_2) 平面原点处的球面波照明。对入射在输入透明片上的球面波前做抛物面近似, 在 (x_1, y_1) 平面中得到用下式给出的场分布:

$$U_1(x_1, y_1) = U_0 \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z}(x_1^2 + y_1^2)\right] t_A(x_1, y_1) \quad (10)$$

把这场分布代入费涅耳传播规律(7)式中, 导致 (x_1, y_1) 的二次相位因子的完全抵消。

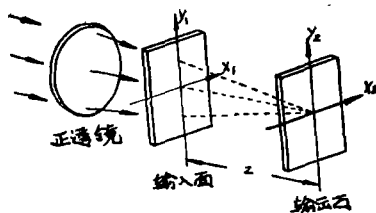


图 2 为求付里叶变换光传播的几何图形

在 (x_2, y_2) 面中观察的强度变成:

$$I_2(x_2, y_2) = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \left| \iint_{-\infty}^{\infty} t_A(x_1, y_1) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \right|^2 \quad (11)$$

因此, 在这个简单系统的输出处强度分布是输入振幅透过率的付里叶变换模的平方。变换的频率参量 v_x 和 v_y 和输出坐标 (x_2, y_2) 的关系是:

$$v_x = x_2/\lambda z, v_y = y_2/\lambda z \quad (12)$$

在分析工作中, 用图 3 的系统代替图 2 的常常是方便的, 在图 3 中, 在一个正透镜的前焦面放输入透明片, 并且在后焦面上度量输出强度分布。对此特殊的几何图形, (x_2, y_2) 二次相位因子消失, 留下一个复场间精确的付里叶变换关系:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{U_0}{\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right] dx_1 dy_1 \quad (13)$$

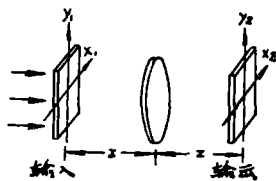


图 3 焦面到焦面的付里叶变换的几何图形

其中 z 是透镜的焦距。虽然这个几何图形对分析来说是方便的, 但在实际上它能导致严重的渐晕 (或遮掩) 问题。然而, 本文在讨论概念时将常常假定这个几何图形。

付里叶分析是这样一个无处不用的数据处理运算，在此甚至列出它的应用主要部分也是不可能的。无论如何，应该提及相干光学付里叶分析已应用在：

- 1) 图样识别和分类；
2. 海洋波周期和方向的分析；
3. 远场波束形成；
4. 宽带信号的频率分析，包括射频(RF)频谱分析。

列出的这个表仅仅是付里叶分析应用的皮毛，它至多不过是对能利用付里叶分析的许多实际问题中的一部分。

III. 线性空间不变滤波

线性空间不变运算也属于用相干光学处理系统较容易完成的那些运算之列。在下面几节中，我们认识这些运算的特性，看怎样能用相干光学实现它们，并且讨论实现滤波器的一些方法。

A 定义

和通常定义一致，如果一个运算或一个系统，对输入和的响应等于运用这些输入单独产生的响应之和，则我们称它为线性的。一个运算或一个系统，如果对一个点源输入的响应，当这点沉在输入平面上移动时，响应仅在位置上变化，在形状或振幅上不变，则我们称它为空间不变。

当一个输入 $f(x, y)$ 服从线性空间不变滤波运算时，输出 $g(x, y)$ 和输入是用下面简单的卷积方程相联系：

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \quad (14)$$

其中 $h(x - \xi, y - \eta)$ 是滤波器在坐标 (x, y) 处对坐标 (ξ, η) 处单位脉冲(点沉)的响应。运用付里叶分析卷积定理，其对应的付里叶变换 G, F 和 H 用下式相联系：

$$G(v_x, v_y) = F(v_x, v_y) \cdot H(v_x, v_y) \quad (15)$$

输入和输出的付里叶谱和所谓传递函数 H 间

简单乘积关系，为付里叶方法在这类系统分析中的运用提供了主要的推动作用。像我们将要看到的那样，它也为用相干光学方法实现这样的运算提出了一个简单的方法。

B 系统结构

从 II-B 部分的讨论，特别从 (13) 式中，清楚地看出：一个给定输入透明片的付里叶变换，用相干光学方法能容易地得到。为求两个函数的卷积，基本上要用两个这样的付里叶变换运算。参考图 4，如果把一个具有振幅透过率 $f(x, y)$ 的输入透明片放在正透镜 L_1 (焦距 z) 的前焦面上，则在后焦面上出现的复场是：

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{U_0}{\lambda z} F(x_2/\lambda z, y_2/\lambda z) \quad (16)$$

为了求 f 和 h 的卷积，必须用 H 乘 F ，并且对这个乘积做逆付里叶变换。在 L_1 的后焦面放一具有振幅透过率 t_A 的透明片：

$$t_A(x_2, y_2) = \kappa H(x_2/\lambda z, y_2/\lambda z) \quad (17)$$

光学上能完成 F 和 H 的乘积运算，产生一个透过场：

$$U'_2(x_2, y_2) = \frac{U_0}{\lambda z} \kappa F(x_2/\lambda z, y_2/\lambda z) H(x_2/\lambda z, y_2/\lambda z) \quad (18)$$

现在，如果在其后一个焦距距离处放置第二个相同的透镜 L_2 ，则在它的后焦面上，场将是 U'_2 的付里叶变换。事实 L_2 是变换，而不是逆变换，导致输出坐标系的倒转，这实际上是不重要的。忽略掉常数因子，于是输出场如所要求的那样，是 h 和 f 的卷积。

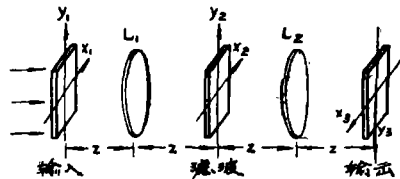


图 4 用于线性空间不变处理的光学系统

应该提到：在处理器输出处可观察的量是强度分布：

$$I(x_3, y_3) = \left| \iint_{-8}^8 f(\xi, \eta) h(x_3 - \xi, y_3 - \eta) d\xi d\eta \right|^2 \quad (19)$$

最后的探测器对输出强度的响应可能是非线性的，产生一个和平方规律关系(19)式不同的总的非线性输出。在任何情况下，记录的输出都将是输出场模的某个函数。例如，通过把输出场的负值改变成探测器响应的正值，模的运算就能在输出处导入人为的结果。除输出场是用干涉方法探测的处理器而外，输出非线性几乎是所有相干光学处理器不可分割的一部分。然而，只要系统使用者知道这些非线性，通常不把它看作是严重问题。

C 滤波器的实现

在讨论履行卷积所要求的系统时，已暗中假设，具有振幅透过率比例于所要求传递函数的滤波平面透明片，的确能做出。我们现在考虑能实现这种透明片的一些可能的方法。

在滤波器实现中遇到的困难，来源于传递函数 H 是复数值这一事实。因此滤波器透过的强度和相位必须同时加以控制，这滤波器常常有相当复杂的空间变化。已有各种方法用来做这种滤波器。

如果传递函数 H 是个在空间复杂性上适当简单的函数，能用分开的吸收和移相掩模独立控制模和相位的透过。例如，如果传递函数完全是实值，但偶尔有几个负叶，则照相透明片能做出提供要求的吸收图案；而在一透明板上沉积薄透明材料的适当图案能提供要求的 180° 相移的图案。必须很好地使吸收透明片引入的讨厌的相移减到最小，并且两个透明片必须仔细地对正。在某些情况下已成功地做出了这种滤波器。

在某些实际情况中，所要求滤波器的脉冲响应可以是简单的（如一个 α 字母），但它的变换——传递函数可能十分复杂。在这种情况下广泛使用范德·勒格特引入的制做滤波器的干涉法。我们假设：振幅透过率正比于所

要求的脉冲响应 $h(x, y)$ 的透明片能做出来或实验上能得到，把这个透明片放在图5所示的透镜的前焦面上。此外，光的一部分被聚焦到前焦面上，离开前焦面光发散，最后在后焦面产生一个倾斜参考平面波。因此，在后焦面观察到参考波和 h 的付里叶变换间的干涉图案，产生的强度分布是：

$$I(x_2, y_2) = \left| A \exp \left[j \frac{2\pi y_0 y_2}{\lambda z} \right] + a H \left(\frac{x_2}{\lambda z}, \frac{y_2}{\lambda z} \right) \right|^2 \quad (20)$$

其中 A 和 a 是常场强， $(x_1 = 0, y_1 = y_0)$ 是前焦面上参考点沉的位置。

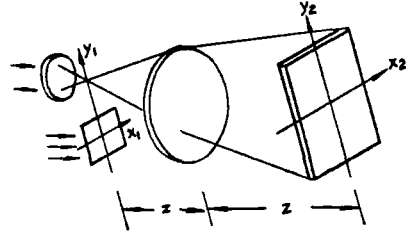


图5 用于干涉法制做滤波器透明片的几何图形

这干涉图案曝光一个照相干板，处理后它产生正比于曝光时入射强度的振幅透过率。因此，透明片的振幅透过率能写成：

$$t_A(x_2, y_2) = t_0 + \beta a^2 \left| H \left(\frac{x_2}{\lambda z}, \frac{y_2}{\lambda z} \right) \right|^2 + \beta A a H \left(\frac{x_2}{\lambda z}, \frac{y_2}{\lambda z} \right) \exp \left[-j \frac{2\pi y_0 y_2}{\lambda z} \right] + \beta A a H^* \left(\frac{x_2}{\lambda z}, \frac{y_2}{\lambda z} \right) \exp \left[j \frac{2\pi y_0 y_2}{\lambda z} \right] \quad (21)$$

其中 t_0 和 β 是常数。在这表达式的第三项，代表振幅透过率比例于所要求传递函数 H 的分量。线性指数因子的作用就是使透过波分量产生倾斜，结果处理器输出的这个分量显现在离轴的位置上，并能把它与透过率其它项引入的另一些输出分量分开。

作为一个额外的收获，(21)式的第四项，产生比例于付氏变换 H 共轭的透过率分

量，它有和前项相反的倾斜角。因此，传递函数 H^* 所滤波的这个输出分量在输出处也显现在离轴位置上，如果需要也能把它分离出来。这个特殊输出分量用在匹配滤波实验中。

最后，我们注意到线性空间不变滤波问题，也可能出现脉冲响应和传递函数都不是简单函数的情况。在这样情况下，借助数字计算机和计算机控制的绘图仪或显示器，凭借产生所要求的空间滤波器透明片的各种方法中的任一个，做滤波器那是可能的。例如，所要求的脉冲响应能作为一个数字阵列放到计算机中去，对应的传递函数能用快速付里叶算法算出来。复值付里叶系数阵列则必须按这样一个方式编码，它要显示一个灰度等级阵列，以便产生一个具有所要求的复振幅透过率分布照相透明片。已经有各种方法通过灰度等级（甚至是二元的）显示，把复值付里叶系数转换成对应的复值振幅透过率分量，但此处将不重复。

D 应用

这类线性空间不变运算，包括极其广泛的各种有用的数据处理运算。这里我们仅以几个已应用这类光学处理的例子来说明一下：

- 1) 在一个复值图案中指向性分量的分离或删除；
- 2) 在二维景物中指定图案的匹配滤波器探测；
- 3) 具有不同结构物体的分类；
- 4) 由已知模糊降低了的象的复原或增强。

IV. 非线性滤波

近几年，人们对用光学手段履行非线性滤波运算的方法产生了相当大的兴趣。在大多数情况中，这个感兴趣的非线性运算能分解成另传播非线性和线性空间不变滤波器的一个序列。“另传播非线性”术语援引自一个

简单的非线性变换 $y = g(x)$ ，其中 x 是输入， y 是输出，并且完全类似于用在时间信号滤波器中的“另记忆非线性”术语。最普通的（但不总是），所要求的运算能用图6中说明的序列表示，在图中，另传播非线性之后用一个线性空间不变滤波器，接着又用第二个另传播非线性。在下面的几节中，我们评述已用来实现非线性滤波运算的各种相干光学方法。

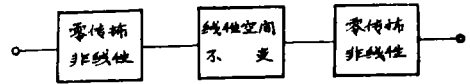


图6 一个典型的非线性处理运算的结构图

A 各种方法

在相干光学数据处理的早期工作中，不难找到非线性处理的例子。例如，在匹配滤波器探测中，在处理器输出处为着增强对应于探测目标的亮光斑和抑制背景，利用一高伽玛（即锐的阈值）胶片，这已是普通的事了。

照片能提供一个非线性变换这个事实已经知道许多年了。就相干光学处理系统来说，有联系的输入和输出量分别是：乳剂受的曝光量（亦即能密度）和处理后照相透明片的最终振幅透过率。在 H&D 曲线的线性区域内，可获得的非线性关系限于：

$$t_A = K E^{-\gamma} \quad (22)$$

其中 K 是个正的常数， γ 是 H&D 曲线的斜率。对负透明片， γ 是个正数；而对正透明片， γ 是个负数。因此，由照相乳剂提供的非线性变换受正或负幂次规律很大的限制。经常要求的是更一般的非线性关系。

在1965年，阿尔米塔奇和洛曼证明了一个用相干光学履行非线性变换的较一般的方法。这个方法我们称作“*theta* 调制”，以图7说明。如果待处理的输入是由恒定但又各不相同的灰度等级的数个分立区域构成的，此时每个不同的灰度等级用一个具有唯一角倾斜的光栅调制。如果最终的编码透明片放在图4相干光学处理系统的输入处，则在频率

域中观测到数个不同的光栅级次。因为图片的不同区域已用不同角度取向的光栅所调制，所以每个光栅级次是和某个指定的灰度等级区域相联系的。用一个频率面上吸收掩模把各衍射级次^[2]减小到预定数目，则处理器的输出显示一个象，它有一组新的分配到图片各子域上的灰度等级。因此，就完成了几个灰度等级的非线性变换。

theta 调制过程在下述意义上是极其普遍的，即能用它履行各种非线性变换，不管是单调的还是非单调的都行。然而，它的运用受到限制，因为目前缺少引入所要求的光栅编码的简单易行的方法，特别是对连续灰度图片的光栅编码。

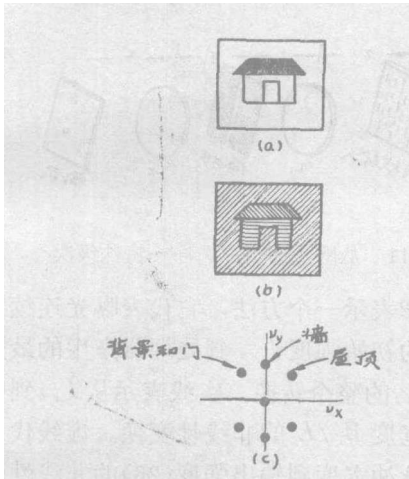


图7 *theta* 调制概念。a) 原图，b) 编码图，c) 频率域光分布

另一类非线性滤波，需要在相干光学处理器频率面上放光色材料或可饱和吸收器。在这种情况下，在给定空间频率域处透过滤器光的数量是在该频率处输入谱强度的函数。这类滤波已经有效地运用，但它的灵活性受到很大限制。通常它要求一个相当高功率的激光光。

实现非线性运算最灵活的方法是依据马克特和迁内在1961年的观察提出来的：把图片加上网线表示的编码，就能在相干光学系统中作非线性变换。我们在下节讨论这个方法。

B 网线处理方法的非线性

网线处理被广泛地运用在刻蚀平面艺术中，作为变连续灰度图片成二元灰度表示的一个手段，它通过脉冲宽度或脉冲面积调制保留灰度等级信息。在图8中说明产生网线透明片的方法。初始照相透明片用一均匀光照明。紧靠这透明片后放一网线屏，它是由局吸收的点或线的周期列阵组成。透过这屏的光落到紧靠它的硬限幅照相乳剂（亦即有很高照相伽玛值的乳剂）上，它记录下二元网线图片。

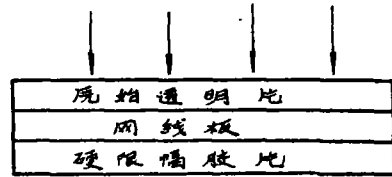


图8 网线透明片的产生

网线烤贝过程的运算，在图9中加以说明。在下分(a)，连续实线表示待处理图片上的密度变化。周期脉冲代表由网线屏贡献的附加密度变化。当这两个密度之和超过所示的阈值密度时，整个吸收足以保证硬限幅胶片不受入射光的作用。当总密度降到阈值以

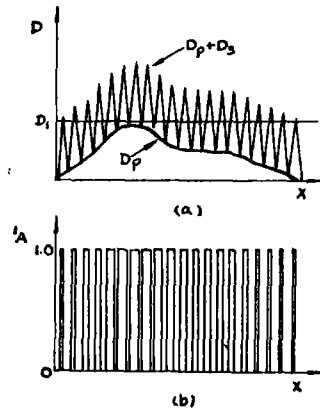


图9 网线编码过程。a) 图片密度 D_p 加上屏密度 D_s 和密度阈值 D_t 。b) 最终网线透明片的振幅透射率

注(2) 实际上，图片的每个子域至少产生三个衍射级(+1, 0, -1)。每个子域仅+1或-1衍射级需要传输到输出平面。

下时, 则硬限幅胶片受光的作用。图 (b) 下分表示, 处理后网线透明片的最终振幅透过率。显然, 把初始图片密度变为透过率脉冲的宽度或面积, 是强烈地受网线屏上单个线或点的密度轮廓的形状的影响。

在一般情况下, 待滤波的量不是初始图片上密度分布, 而是图片最初受的曝光量分布。最初曝光量分布 E_p 和网线透明片的振幅透过率 t_A 间的关系在理想情况下能用下式表示:

$$t_A = \frac{1}{2} [1 + \text{sgn}(D_p + D_s - D_i)] \quad (23)$$

其中 $\text{sgn}(x)$ 对 $x > 0$ 是 1, 对 $x < 0$ 是 -1。 D_p 是初始图片的密度, 在假设图片记录在 H&D 曲线 (具有照相伽玛 γ_p) 线性区的条件下, 用下式给出:

$$D_p = \gamma_p \log_{10} E_p + D_0 \quad (24)$$

其中 D_0 是个常数。量 D_s 和 D_i 分别代表屏和密度阈值的密度。

方程 (23) 和 (24) 充分地描述了初始图片信息按网线透明片振幅透过率表达的非线性编码。当把网线透明片放入相干光学处理系统中时, 产生第二个非线性变换。为了领会这第二个非线性, 我们假设一个一维网线屏, 把 D_p 和 t_A 当成单个空间变量 x 的函数, 而有效地保持第二个变量 y 为常数。如果网线屏的周期 L 和图片中最高频率分量的周期相比较是小的, 则在任一局域区域上, 振幅透过率近似是具有固定宽度 W 的周期脉冲串, 如图 10 所示。根据 (23) 式, 宽度 W 依赖于局域图片密度 D_p 和网线屏上线的密度轮廓 $D_s(x)$ (假设阈密度 D_i 不依赖于 x)。因此, 网线透明片最终的准周期振幅透过率能展成复付里叶级数,

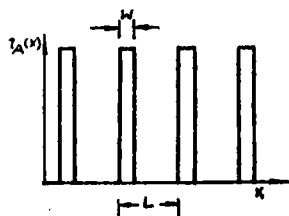


图 10 网线透明体的局部区域

$$t_A(x)$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\sin[\pi k w(x)/L]}{\pi k} \exp\left[j \frac{2\pi k x}{L}\right] \quad (25)$$

在上式求和中, 每一项代表一个被调制的光栅级次, 因此将表现为频率域中的一个孤立谱点。如图 11 所示, 在相干光学处理器的付里叶平面中放一掩模就能选出单个光栅级次; 然后这个级次贡献的光到达输出平面。当选择第 k 个衍射级次时, 则在处理器输出处产生的强度分布是:

$$I(x, k) = \begin{cases} \left[\frac{w(x)}{L}\right]^2 & k = 0 \\ \left[\frac{\sin(\pi k w(x)/L)}{\pi k}\right]^2 & k \neq 0 \end{cases} \quad (26)$$

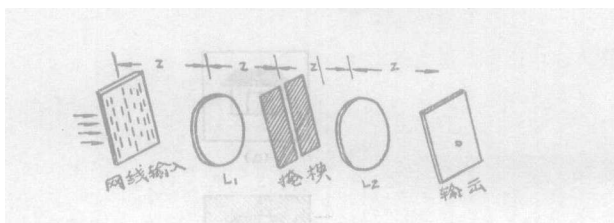


图 11 从网线透明片选择一特殊级次

图 12 表示一个方法, 它代表曝光连续灰度照片的初始强度 I_{in} 到处理器产生的最后强度 I_{out} 的整个转换。实线表示从 I_{in} 到归化脉冲宽度 W/L 的非线性变换。虚线代表从归化脉冲宽度到输出强度 (26) 的非线性变换, 这里是对第二级衍射分量 ($k=2$) 做的图解。点线跟踪两个输入值 i_1 和 i_2 , 首先到它们各自脉冲宽度, 然后到它们对应的输出强度 i'_1 和 i'_2 。

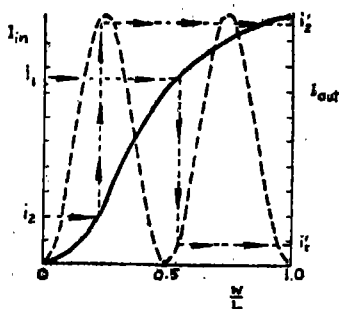


图 12 初始强度到新强度的典型的非线性变换。

C 应用

上面描述的用于非线性滤波的方法中，最灵活的是网线法。运用这个方法的如下应用已得到证明：

1. 同形或对数滤波去分离多重的信号和噪音；
2. 对连续灰度图片产生等图片亮度的多重轮廓；
3. 对连续灰度图片产生单个窄条亮度范围的轮廓或等级切片 (level slicing)；
4. 图片模拟到数字化的转化。

在相干光学中非线性滤波领域，目前仍然有相当多的问题没有揭示出来，并且希望在不远的将来能证明有其它的应用。

V 线性空间变化滤波

至今研究最少的一类相干光学处理是线性空间变化滤波。这种滤波器有一个在输入场上变化的脉冲响应。在这种情况下，输出 $g(x, y)$ 和输入 $f(x, y)$ 通过迭加积分相联系：

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x, y; \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (27)$$

其中 $h(x, y; \xi, \eta)$ ，是滤波器在 (x, y) 处对 (ξ, η) 处所加的单位脉冲的响应。因为卷积关系式(14)不再成立，简单的付里叶域处理不再可能。而必须去寻找对输入场的不同 η 产生不同光学脉冲响应的技术。

解决这个问题一个方法，是运用全息频率面滤波器，它利用布喇格角的选择性，有效地把不同传递函数用到输入场的不同 η 。能按这方式实现的空间变化脉冲响应的复杂程度，依赖于如何把许多不同全息图迭合成单个厚的透明片。关于这个方法的实用性的研究还在进行着。

第二个方法是以一个称做坐标变换处理 (CTP) 的方法为依据的。最初，罗宾斯和黄用这个方法来清除空间变化像差对象的影

响，桑丘克用它来清除运动造成的模糊，以前工作的极大多数是利用数字处理机的。在下面材料中，我们说明 CTP 法并描述在光学上实现这种滤波器一些方法。

A 座标变换处理

CTP 方法根据这样一个事实，即一类很广泛的空间变化滤波运算能分解成顺序的坐标变换和线性空间不变滤波运算。

参考图13，如果待处理的数据用 $f(x, y)$ 代表，于是这个数据先做一个一一对应的可逆的几何形变，数学上用下式表示：

$$\begin{aligned} u &= D_1(x, y) \\ v &= D_2(x, y) \end{aligned} \quad (28)$$

几何上形变了输入 $\tilde{f}(u, v)$ ，再做一个用下面卷积描述的线性空间不变滤波运算。

$$\tilde{g}(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\xi, \eta) h(u - \xi, v - \eta) d\xi d\eta \quad (29)$$

最后，所产生的输出做一个用下面坐标变换描述的逆几何形变：

$$\begin{aligned} x &= C_1(u, v) \\ y &= C_2(u, v) \end{aligned} \quad (30)$$

因此，产生滤波输出 $g(x, y)$ ，

B 座标变换处理的光学实现

卷积积分 (亦图13的中间方框) 在光学上能用 III-B 节描述的技术实现。较难的任务乃是用光学方法去执行坐标变换或空间形变。

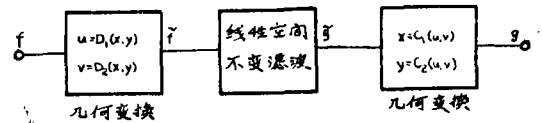


图13 座标变换处理的方框图

如果光学系统的输入是由扫描电子光学装置提供的，则输入数据的空间形变，能在扫描栅上的非线性扫描来完成。加萨森特和普萨尔蒂斯已用这种方法在相干光学处理器中实现梅林变换。

布令代耳证明了执行二维形变的另一种方法，并且在图14中加以说明。待几何变换的输入数据以透明片的形式放在正透镜的前焦面上。和透明片接触放一个计算机制的全息图。为了讨论的简单，我们假设这个全息图振幅透过率为：

$$t_A(x, y) = \exp[j\phi(x, y)] \quad (31)$$

而在实际中相位函数 $\phi(x, y)$ 可用空间载频的相位调制实现。令这个全息图的“局下空间频率”用下式定义：

$$\begin{aligned} v_x(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) \\ v_y(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) \end{aligned} \quad (32)$$

假定“局下空间频率”概念是有效的，则通过全息图 (x, y) 坐标处的光，将到达透镜后焦面上的坐标处：

$$\begin{aligned} u &= \lambda z v_x(x, y) \\ v &= \lambda z v_y(x, y) \end{aligned} \quad (33)$$

因此坐标变换：

$$\begin{aligned} u &= \frac{\lambda z}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) \\ v &= \frac{\lambda z}{2\pi} \frac{\partial}{\partial y} \phi(x, y) \end{aligned} \quad (34)$$

已被履行。

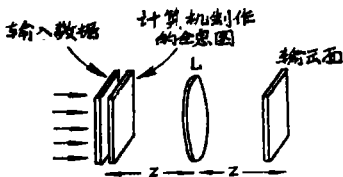


图14 用计算机制全息图产生几何形变

这个方法对坐标变换是非常灵活的，但它受到一个严重的障碍：仅当输入数据和全息图的空间结构相比较是粗糙的，说通过全息图 (x, y) 坐标处的光将到达(34)式的焦面坐标 (u, v) 处才是正确的。能说明这个要求给待处理输入数据的复杂程度上放了个严重限制，因此限制了能够被并行处理的图片单元的数目。

执行空间形变的第三个方法示于图15。

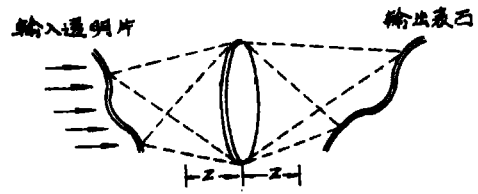


图15 用简单透镜的几何形变

让输入透明片弯曲成规定的形状。弯曲的透明片用一简单透镜成像到另一弯曲的表面，即与输入表面对应的几何像面上。适当选择输入（和对应的输出）表面，就能实现某些类型的几何变换。能对高度复杂的图像实施这种形变，但不幸的是，这类能实现的形变仅限于对几个特殊问题才有价值。

为了完善这个讨论，我们下面叙述两个能用来执行一维函数的几何形变的技术。这两个技术是罗兹，为执行一维信号的频率变化谱分析而提出的相干光学处理方法的改进。首先看图16，待处理的数据在输入处排列成一些单个的水平线。一掩模每次选出一个水平线。透镜 L_1 是一柱透镜和一球透镜的组合，它在水平方向上成像，但在垂直方向上作付里叶变换，在 P_2 面上产生一个在水平方向上的像，但在垂直方向近似为不变结构。因此，一维输入在垂直方向上就被涂抹。在 P_2 面上放一掩模，有一个细的沿几何曲线 $y_2 = g(x_2)$ 的透明条，但其余部分是不透明的。透镜 L_2 还是一柱透镜和一球透镜的组合，在这情况下，在垂直方向上成像，在水平方向抹掉。最后，放一个垂直输出缝把输出记录限制为一条线。

记录的输出函数是输入的空间形变了。记录的复本形式，输入的空间形变只依赖于在 P_2 面中透过曲线的形状。如果输入和输出缝一起

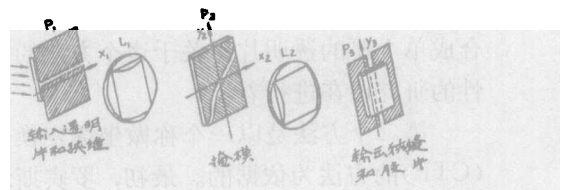


图16 产生一维形变的系统

移动，一维函数的整个阵列能按同一方式被形变。用这方法能实现的形变是十分普遍的，但一维数据的复杂性多少要受 P_2 面的透过曲线所必须的有限宽度的限制。此外，到达输出面光的数量是初始入射光的一小部分，在某些情况中，它可能成为实际问题。

为引入一维形变的第二个技术依据下述事实：如果 $F(v)$ 代表 $f(x)$ 的一维付里叶变换，则由付里叶积分定理有：

$$f[g(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} F(v) \exp[j2\pi v g(x)] dv \quad (35)$$

这关系式提示：输入数据的一个单线能用图17表示的光学系统作空间形变。输入缝只允许函数 $f(x_1)$ 进到这个系统。透镜 L_1 是具有焦距 z 的球透镜，对输入做二维付里叶变换。对于足够窄的输入缝，在后焦面上复振幅的水平分布是： $(\frac{1}{\lambda z})F(\frac{x_2}{\lambda z})$ ，而在垂直方向涂抹或均匀化。现把一振幅透过率：

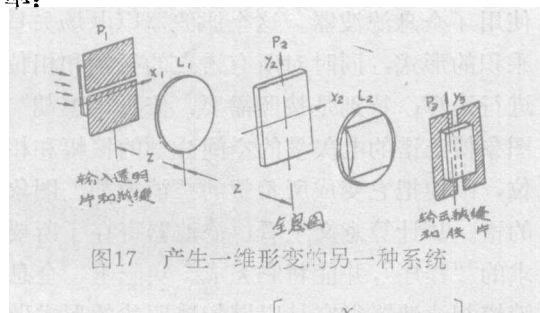


图17 产生一维形变的另一种系统

$$t_A(x_2, y_2) = \exp\left[j2\pi \frac{x_2}{\lambda z} g(y_2)\right] \quad (36)$$

的全息图放在 L_1 的后焦面上。在这个全息图的后面是一球——柱透镜组合 L_2 ，它在水平方向上做付里叶变换，垂直方向上成像。在输出平面中沿 y_3 轴放一缝，我们观察到作为 y_3 函数的一个场分布，用下式给出：

$$\begin{aligned} U(y_3) &= \int_{-\infty}^{\infty} F\left(\frac{x_2}{\lambda z}\right) \exp\left[j2\pi \frac{x_2}{\lambda z} g(y_3)\right] \frac{dx_2}{\lambda z} \\ &= f[g(y_3)] \end{aligned} \quad (37)$$

因此，函数 $f(x)$ 按要求形变了。这技术是十分灵活的，在光的利用上比前面描述的一

维技术能更有效。

已经描述了光学上执行空间形变的各种方法。不幸的是，讨论的这些技术没有一个具备人们所希望的全二维特性。理想的，执行形变的方法应该有如下属性：

1. 它应该能对输入数据做并行运算，而不必扫描或连续探查一维部分；
2. 它应该是灵活的，允许实现各种广泛的形变；
3. 它应该能对高度复杂的像做运算，或等价的，它的空间带宽乘积应该是和后面那个卷积处理器的空间带宽乘积相当。具有所有这些属性的技术目前还不知道。

C 应用

存在相当数量的数据处理问题，它们要求作空间变化处理。下面列出的也只是些例子，其中第一个已用光学方法试过了。

1. 执行梅林变换来实现不依赖于比例尺或放大率的图样识别系统；
2. 恢复空间变化象差降低了的像质；
3. 恢复空间变化移动模糊降低了的像质；
4. 履行艾贝尔变换，以便从它的投影重构元对称轮廓；
5. 恢复空间变化源半影模糊了的射线照片。

VI. 结 论

本文已概述了用相干光学数据处理系统能完成的各种运算。本文的主题之一是这样一些系统，它不局限于以前可以想像得到的那种可完成的运算。然而，在增加灵活性的各种方法上反映的是，常常伴随着处理系统的空间带宽乘积容量的某些减少。况且，增加灵活性本身，将不足以大大增加这类处理系统的运用。以并行方式快速输入和输出的一些主要问题仍然是个严重障碍，但是，这个问题已在全世界受到相当的重视。

(金友译 遼小靖 校)