

# 光学信息处理讲座

## 第二讲 半色调方法实现非线性变换

戴建华 张洪钧

(中国科学院物理研究所)

### 一、引言

光学信息处理系统具有二维、并行、高速地完成傅里叶变换、相关和卷积等线性运算的能力。在典型的光学处理器以及低功率的情况下,除非使用特殊的技术,一般只能实现线性运算。但是,许多信息处理的应用又要求对数据进行非线性运算。过去,非线性变换主要是通过数字方法实现的。现在已经使用了多种技术来实现光学非线性运算(变换)。最方便的方法是利用胶片特性曲线的非线性,实现非线性变换。例如,对数变换<sup>[1]</sup>,密度切片的提取<sup>[2]</sup>等。

可饱和吸收体以及在某些情况中的光学反馈,也是实现非线性光学运算的重要途径<sup>[3,4]</sup>。由于介质的非线性光学效应,一般都属强光效应,因此需要较高的功率才能完成。若在相干光处理器的频率平面放置光色材料<sup>[5]</sup>,则对给定的空间频率,透过滤波器的光量值是该频率的输入谱强度的函数。但这种系统的应用受激光器件和运算灵活性差的局限。

另一个用来完成非线性变换的方法,称为 $\theta$ 或 $\theta$ 调制<sup>[6]</sup>。这种方法是将亮度等级局部地转换成光栅的不同旋转角,通过对这些亮度等级进行选择性的空间滤波,可以得到非线性变换的功能。但是目前还没有简便的方法来实现光学的 $\theta$ 调制,特别是对于连续色调图形,因而限制了它的应用。

1961年 Marquet 和 Tsujiuchi<sup>[7]</sup> 在分析半色调图片的频谱和去除网点结构的研究工作中,为实现非线性运算提供了一种新的灵活的方法。这个方法需要进行一次预处理,然后在线性相干光处理系统中进行空间滤波。原则

上,可以根据不同的非线性运算来设计相应的半色调屏。采用半色调处理已经成功地实现了若干重要的非线性功能。例如,可实现对数变换,从相乘性噪声中提取信号<sup>[8,9]</sup>;在连续色调图象上获得等密度轮廓分布;按密度等级对黑白图象进行假色编码<sup>[10,11]</sup>以及实现图象的模-数转换<sup>[12,13]</sup>等。因此,这个方法已成为光学信息处理中实现非线性变换的一个重要方法。下面介绍其原理、方法及可能的应用。

### 二、原理

半色调方法早已在印刷工业中广为使用,在图象印刷中,为了保留图象的连续色调,采用加网方法,网点的面积随原图象的密度变化。这种用二进制网点图象(半色调图象)来代替原来的连续色调图象的过程,用通信理论的话来说,相当于脉冲宽度调制(简称脉宽调制)。把任意连续信号编码成一串等间隔不等宽度的脉冲信号,为了恢复原来的信号,需要通过一低通滤波器来平滑。对半色调图象而言,这种解码是利用人眼本身是低通空间滤波器的作用来平滑的,从而获得了连续色调图象的效果。对图象进行类似加网的过程称为半色调预处理,在得到半色调二进制照片后,再在光学处理系统中进行空间滤波,这两个步骤便构成了整个半色调非线性运算。

#### 1. 半色调预处理

为叙述方便,我们只考虑一维情况。半色调预处理方法如图1所示。待处理的连续色调透明片用一束均匀光 $I_0$ 照明,紧靠透明片之后放置一块作变换用的半色调屏,透过这块屏的光 $I_1(x)$ 对高反差的胶片进行曝光,经洗相后即

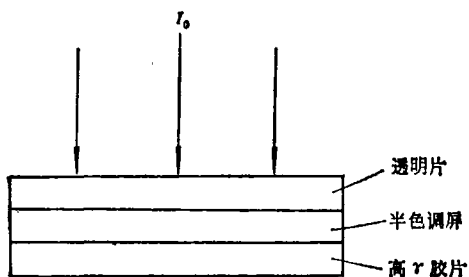


图1 半色调预处理方法

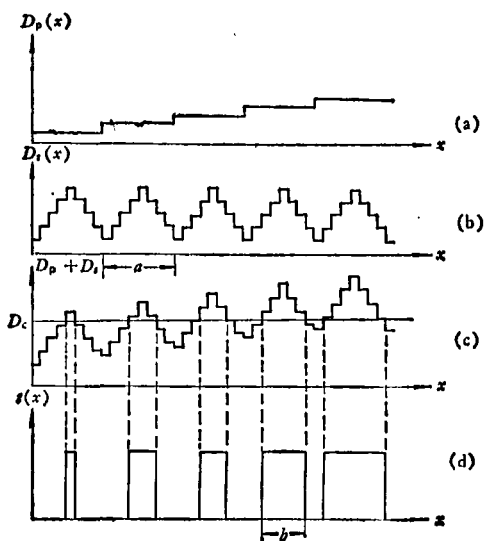


图2 半色调预处理过程

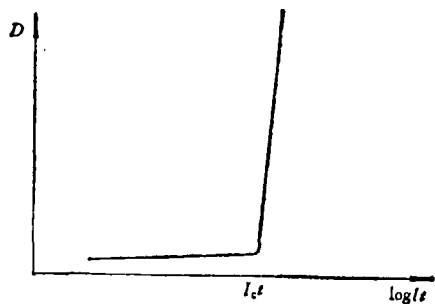


图3 高γ胶片的特性曲线

完成了半色调预处理。

半色调预处理的运算过程如图2所示。图2(a)表示待处理图片的密度分布  $D_p(x)$ ，为比较明显地说明处理过程，假定  $D_p(x)$  的密度随  $x$  线性增加。图2(b)表示一维半色调屏的密度分布  $D_s(x)$ ，周期为  $a$ ，每个周期内有5个密

度等级分布。图2(c)为待处理图象与半色调屏紧密接触后，两图片的总密度分布为  $D_p(x) + D_s(x)$ 。其中  $D_c$  为相应于曝光阈值  $I_c$  的密度值。半色调预处理所用的高  $\gamma$  胶片，可看作一个非线性元件，起门限作用，特性曲线如图3所示。在理想情况下胶片的透过率是二进制的。即当曝光光强  $I \geq I_c$  时，胶片感光；当  $I < I_c$  时，胶片不感光。相应于在图2(c)中当  $D_p + D_s > D_c$  时，胶片不感光；当  $D_p + D_s \leq D_c$  时，胶片感光；经显影处理后即可得到透过率  $t(x)$  为二进制的照片，称为半色调照片如图2(d)所示。感光后的线条宽度  $b(x)$  是  $x$  的函数。

由此可知，通过半色调预处理可把原图片中不同的密度分布转换为周期（由半色调屏的周期决定）相同，宽度不同的光栅。这与通信论中脉冲宽度调制类似。因此，半色调预处理过程也是抽样过程。由抽样理论可知，只要半色调屏的空间频率足够高，即在被处理图片最细致结构周期中不少于两次抽样，则经过解调处理就不会丢失图象的信息。下面分析半色调预处理过程实现的非线性运算。

胶片的光密度  $D$  与透过率  $T$  之间的关系为

$$D = \log(1/T) \text{ 或 } T = 10^{-D} \quad (1)$$

设在图1中，均匀照明光强为  $I_0$ ；透过图片入射到半色调屏上的光强为  $I_{in}(x)$ ；透过半色调屏入射到半色调屏上的光强为  $I_t(x)$ 。根据(1)式可得到如下一些关系：

$$I_{in}(x) = I_0 \cdot 10^{-D_p(x)} \quad (2)$$

$$I_t(x) = I_{in}(x) \cdot 10^{-D_s(x)} \quad (3)$$

根据高  $\gamma$  胶片的特性，当  $I_t \geq I_c$  时，胶片感光，显影后在相应的  $x$  处是不透明的；当  $I_t < I_c$  时，胶片不感光，经显影处理后，在相应的  $x$  处是透明的。可由(3)式求出胶片感光后反映原图象密度的线条宽度  $b(x)$  与输入光强之间的关系。

由高  $\gamma$  胶片的特性可知，只有满足不等式

$$I_t(x) \geq I_c \quad (4)$$

所对应的  $x$  处，胶片才感光。将(3)式与(4)式合并可得到

$$\frac{I_{in}(x)}{I_c} \geq 10^{D_s(x)}. \quad (5)$$

(5)式即为使胶片感光的条件。对(5)式取对数

$$\log(I_{in}/I_c) \geq D_s(x). \quad (6)$$

取(6)式的反函数

$$x \leq D_s^{-1} \log(I_{in}/I_c). \quad (7)$$

从(7)式可知,对给定的半色调屏,反映原图片密度变化的线条宽度  $b(x)$ ,取决于  $I_{in}$  (图象信息)和胶片的曝光阈值强度  $I_c$ ,二者之间是非线性关系。到此为止,完成了第一次非线性变换。

## 2. 光学滤波

把上面得到的半色调照片放入图4所示的

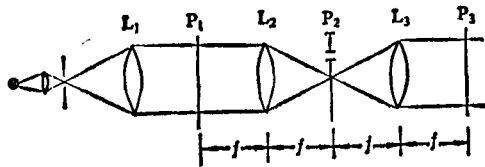


图4 光学处理系统

光学处理系统中,即可完成第二次非线性变换。在一个无限不透明背景上,宽度为  $b$  的透明狭缝的透过率函数  $v(x)$  为

$$v(x) = \text{rect}(x/b). \quad (8)$$

而在不透明背景上,间隔为  $a$ ,宽度为  $b$  的这种线条的一维无限列阵可表示为

$$u(x) = v(x) \otimes [(1/a)\text{comb}(x/a)] \\ = \text{rect}(x/b) \otimes [(1/a)\text{comb}(x/a)], \quad (9)$$

其中

$$\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-a)$$

为梳状函数。而图2(d)所示的分布是在透明背景上的不透明线条列阵,可以表示为

$$t(x) = 1 - u(x) = 1 - \text{rect}(x/b) \otimes \\ [(1/a)\text{comb}(x/a)], \quad (10)$$

$t(x)$  为半色调照片的局部透过率函数。若将半色调照片置于透镜  $L_2$  的前焦面  $P_1$  上,则在  $L_2$  的后焦面  $P_2$  上的分布即为它的傅里叶变换

$$\mathcal{F}[t(x)] = \delta(f_x) - b \text{sinc}(bf_x) \text{comb}(af_x) \\ = \delta(f_x) - \left(\frac{b}{a}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta$$

$$\cdot \left(f_x - \frac{n}{a}\right) \text{sinc}(bf_x), \quad (11)$$

$\mathcal{F}[\ ]$  表示傅里叶变换运算。(11)式表示的是一组幅度被  $\text{sinc}$  函数调制的  $\delta$  函数。所有的图象信息都集中在  $P_2$  面上  $f_x = 0, \pm 1/a, \dots, \pm n/a$  的频谱斑上。在谱平面  $P_2$  任选一级(例如第  $n$  级),经透镜  $L_3$  作逆变换,则在  $L_3$  的后焦面  $P_3$  上的第  $n$  级光场振幅分布为

$$\mathcal{F}[\mathcal{F}[t(x)]] = -\left(\frac{1}{n\pi}\right) \\ \cdot \left(\frac{1}{\lambda f}\right) \sin(n\pi w), \quad (12)$$

其中  $w = b/a$   $0 < w < 1$ , 相应的强度为

$$I_n(w) = \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \left(\frac{1}{n\pi}\right)^2 \sin^2(n\pi w). \quad (13)$$

(13)式表明,经光学系统处理后的光强输出与线宽  $b$  之间也是非线性关系。通过(7)式和(13)式,可建立输入光强和输出光强之间的关系为

$$I_n(b) = \left(\frac{1}{n\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \\ \cdot \left[\frac{n\pi}{a} D_s^{-1} \log \frac{I_{in}(x)}{I_c}\right]. \quad (14)$$

可用图5说明通过线宽  $b$  建立的输入光强和输出光强之间的非线性关系。图5中实线表示由(7)式给出的  $I_{in}$  与线宽  $b/a$  之间的非线性关系。虚线则表示由(14)式给出的线宽  $b$  与输出光强之间的非线性关系。取  $n=2$  为例。若给定

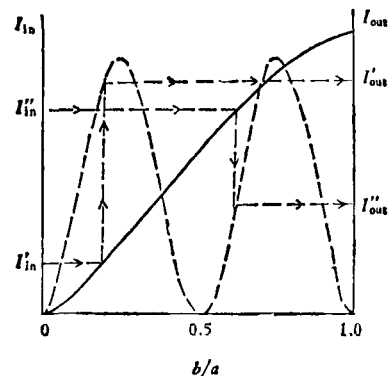


图5 输入光强与输出光强的非线性关系

一个输入光强  $I'_{in}$ , 根据  $b$  和  $I_{in}$  之间关系的实线图, 找到相应的  $b$  值, 再根据  $I_{out}$  和  $b$  关系的虚线图找到相应的输出光强  $I'_{out}$ , 如箭头所示. 同样可以找到相应于输入光强  $I'_{in}$  的输出光强  $I'_{out}$ . 由图 5 表示的关系图, 可以明显地看到输入光强与输出光强之间的非线性关系. 原来输入光强高的  $I'_{in}$  经变换后, 输出  $I'_{out}$  反而变低了; 而原输入光强低的  $I'_{in}$  经变换后, 输出  $I'_{out}$  变强了. 若选取不同的  $n$  值, 将使原图象中某些强度得到加强, 而另一些强度受到抑制. 以上是在半色调屏的形式为一维对称分布情况下导出的输入与输出之间的变换关系. 原则上可根据不同的运算形式设计所需要的半色调屏.

### 三、方 法

利用半色调方法实现非线性变换的关键是制备满足运算要求的半色调屏.

#### 1. 半色调屏的制备

作为商品的半色调屏一般是二维的, 主要用于印刷制版, 但某些屏也能用来实现某些非线性变换, 如 Kato 和 Goodman 所完成的对数变换<sup>[14,15]</sup>, 使用的屏是 kodak cray contact screen (100l/in, 椭圆形点). 然而多数非线性变换所需要的屏是市场上买不到的, 需要按要求的变换形式制作. 制作半色调屏有多种方法: 如使用分步重复照相机, 或者做一个规则光栅的离焦复制片; 使用显微光密度计; 或者利用 Lohman 和 Strand 的二进制光栅的光学滤波等<sup>[16-18]</sup>. 下面仅举二例说明之.

(1) 一维对称半色调屏的制作: 一维对称半色调屏类似光栅, 只是每个周期内有若干等级的密度分布, 其传递函数如图 2(b) 所示. 可以通过 Goodman<sup>[19]</sup> 介绍的位移光栅法实现. 为了制作方便使用一维 Ronchi 光栅, 在精密平动台上制作, 屏的各阶宽度  $\Delta x$  由位移平台调节. 根据胶片的感光特性曲线确定各阶密度所需要的曝光量. 具体作法是: 将胶片(或干板)胶面向上固定在平台台面上, Ronchi 光栅胶面向下平放在胶片上. 移动平台, 每移动一次曝光一

次, 每次移动距离为  $a/2N$ , 其中  $a$  为光栅周期,  $N$  为屏的阶数. 曝光时间根据各阶密度值由胶片的 H-D 曲线定出, 最后按规定显影处理. 我们使用的是 Kodak HRP 干板, 在 20℃ 条件下用 D-76 显影 12min. 为了能够得到阶数多, 密度范围宽的屏, 需使用分辨率高, 反差较低的胶片. 所用的 Ronchi 光栅应满足抽样定理, 空间频率至少为 10l/mm 以上.

(2) 用显微光密度计制作特殊要求的半色调屏: 具体作法是把一张低反差的胶片胶面向下放在密度计的扫描台上, 由计算机给出实现非线性变换所需要的图形. 适当选取显微镜台孔径和聚焦, 可以使线宽最小值为 10 $\mu$ m. 在显微密度计上制作半色调屏是很慢的, 但它却提供了选择屏参数的灵活性.

#### 2. 制作半色调照片

高  $\gamma$  胶片胶面向上放在放大机的底座上, 半色调屏胶面向下放在高  $\gamma$  胶片上, 待处理图片胶面向下放在半色调屏上(如图 1 所示), 为保证三者之间有良好的接触, 需在三张胶片上压一块玻璃板. 放大机提供曝光所需光源, 要求光源的光强均匀, 由不均匀度引起的密度变化应小于半色调屏各阶密度的最小密度差. 通过改变曝光时间和透镜孔径改变曝光量. 曝光后的胶片根据所用胶片类型按规定显影处理. 我们利用 Kodak kodalith ortho 2556 和日本小西六, 樱花 OS-100E 胶片制作半色调片,  $\gamma = 11$ , 最小密度差  $\Delta D = 0.15$ . 另外国产片中天津胶片厂, 保定胶片厂以及汕头胶片厂生产的 OS 片; 配以专用显影液反差也能达到  $\gamma = 8$  以上, 也适用于制作半色调片.

#### 3. 光学空间滤波

把上面制得的半色调片放入图 4 所示的光学系统正透镜  $L_2$  的前焦面  $P_1$  上, 在  $L_2$  的后焦面  $P_2$  即为半色调输入片的频谱. 在  $P_2$  面上可用小孔或狭缝选择所需要的传递函数的衍射级通过, 小孔或狭缝的孔径应小于或等于频谱斑之间的间隔, 只让特定衍射级中包含的最大信息量通过, 去掉其余的衍射级. 被通过的衍射级由透镜  $L_3$  进行逆变换, 在  $L_3$  的后焦面  $P_3$  上得到

消取样的输出,即为非线性变换的输出。

光学系统的光源,可以用激光器作光源,也可以用普通的白炽灯作光源。实验表明,在图象假色编码的应用中,用白光作光源,成本低、噪声小,图象质量高。

#### 四、应用举例

到目前为止,它的一些很成功的应用有:

##### 1. 在连续色调图象上产生等密度轮廓线以及对黑白图象按密度等级的密度假色编码

方程(13)是产生等密度轮廓和进行假色编码的基础。由该式可知,第 $n$ 级衍射对输出的贡献将随 $w$ 按正弦平方形式变化。并且出现极大值的数目也为 $n$ ,在最大值之间有 $(n-1)$ 个极小值。若用单色光作光源,对 $n=1$ 的衍射级,在 $w=0.5$ 时输出最大;对 $n=2$ 的衍射级,在 $w=0.25, 0.75$ 处输出最大,而在 $w=0.5$ 处输出最小;对 $n=4$ ,在 $w=0.125, 0.375, 0.625, 0.85$ 处输出最大,而在 $w=0.25, 0.50, 0.75$ 处输出最小。依次类推,第 $n$ 级衍射有 $n$ 个极大值,对应 $n$ 条等密度线。选取不同的衍射级,将使某些密度等级的图象输出得到加强,而使另一些密度等级的图象输出受到抑制,这样就自然形成了等密度线分布。此技术已用于激光模式的检测<sup>[20]</sup>。将激光束通过半色调屏投射到高 $\gamma$ 胶片上,显影处理后放入图4中光学系统的 $P_1$ 面上,用单色光照明,在 $P_3$ 平面上就得到了被测激光束的等强度轮廓分布。我们用此方法检测了单模 He-Ne 激光,  $A_1^+$  激光以及多模的脉冲激光的模式。

##### 2. 图象的假色编码

若用白光作照明光源,谱平面 $P_2$ 上第 $n$ 级的坐标位置 $x_2 = n\lambda f/a$  ( $\lambda$ 为波长,  $f$ 是透镜焦距,  $a$ 为半色调屏周期)。在同一级中,不同波长的光将位于不同的位置,短波部分靠近光轴,长波部分远离光轴,从而使每一个衍射级形成一条彩带。可以在不同的级次中选择不同的颜色组合,从而实现了不同级次不同色彩之间的彩色合成。衍射级愈高,彩带展得愈宽,相邻级

次的彩带逐渐重叠,可以用一个小孔使相邻二级中较低级次的长波和较高级次的短波部分同时通过,即实现了彩色合成的目的。色彩反映了原图象的密度分布,从而成为图象增强的一种有效的方法。我们已在遥感和肺部X线的图象处理中应用了这种处理方法,效果较明显<sup>[21,22]</sup>。

#### 五、讨论

本文主要介绍了用半色调方法实现非线性模拟光学处理的原理、方法及可能的应用。原则上这种方法是普遍的,使用这种方法能够实现任意的非线性变换。使用这种方法的关键在于半色调屏本身和用来记录半色调图片的高 $\gamma$ 记录介质。如果希望实现这种方法的全部潜在应用,就需要提高制作复杂半色调屏的技术以及使用高 $\gamma$ 的记录介质。另外预处理过程限制了它的实时性,因此研制具有有限幅特性的实时空间光调制器是实现实时非线性变换的关键。

#### 参考文献

- [1] A. Tai et al., *Appl. Opt.*, **16** (1977), 2559.
- [2] 张洪钧、戴建华、吕迺光, *物理学报*, **29**, (1980), 956.
- [3] K. T. Stalker et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974), 545.
- [4] S. H. Lee, *Opt. Eng.*, **13** (1974), 196.
- [5] N. H. Farhat, *IEEE Trans. Compt.*, **C-24** (1975), 443.
- [6] J. D. Armitage et al., *Appl. Opt.*, **4** (1965), 399.
- [7] M. Marquet et al., *Optica Acta*, **8** (1961), 267.
- [8] A. V. Oppenheim et al., *Proc. IEEE*, **56** (1968), 1264.
- [9] H. C. Andrews et al., *IEEE Spectrum*, **9** (1972), 20.
- [10] 张洪钧、戴建华、张家驹, *激光*, **5-6**(1978), 44.
- [11] Tai, A. Yu et al., *Opt. Lett.*, **3** (1978), 190.
- [12] T. C. Strand, *Opt. Commun.*, **15** (1975), 60.
- [13] A. W. Lohman et al., *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976), 170.
- [14] H. Kato and J. W. Goodman, *Appl. Opt.*, **14** (1975), 1813.
- [15] H. Kato and J. W. Goodman, *Opt. Commun.*, **8** (1973), 378.
- [16] T. C. Strand, *Opt. Commun.*, **15** (1975), 60.

(下转第403页)