

# 数字图象处理方法

容 观 澳

(清华大学电子工程系)

在物理实验和应用光学中时常遇到图象处理问题。过去的图象处理多采用光学方法。但是近几十年随着电子计算机的迅速发展,特别是高速计算能力和小体积大容量存储器的发展才使数字化图象处理方法成为现实。在现代化的实验室中进行科学实验,不但在数据计算、分析,实验方案的设计安排方面使用电子计算机,而且在波形、图形的分析综合和图象处理方面除了光学方法之外也都大量地使用计算机。用电子计算机进行数字化处理不但速度快、精度高,而且除了复杂图象处理所需时间稍长以外一般都已经作到实时处理和传送。随着科学的发展,人类对于宏观世界和微观世界的探索中有大量的图象和数据需要及时进行处理,因此使用计算机的数字图象处理方法大量用于实验物理、光学仪器以及光学电子学混合图象处理系统中。例如在高能物理中追踪泡室中粒子轨迹以及从卫星上拍摄的多光谱图象中都包含大量的科学数据,由于其数据量太大了,必须用机器来自动识别判读才能及时地获得重要结论,此时数字图象处理技术更是不可缺少的了。

## 一、数字图象处理的特点

### 1. 针对性

由于人类或机器对于某些图象需要了解的内容不同,例如有的问题要求了解轮廓,有的要求了解灰度细节等,所以数字图象处理方法是很有针对性的。对于这类图象有良好处理效果的方法,对于另一类图象处理效果可能很差。

### 2. 算法

电子计算机只是一个有效的工具,但使用时应根据不同的处理方法采用不同的计算方法。采用的算法不同往往使图象处理的效果有很大差异。

### 3. 技术的综合性

数字图象处理技术的迅速发展是综合了各个学科领域中较先进的成果而得到的,如数学、物理学、心理学、生理学、语言学、计算机科学、通讯理论、控制论和

系统工程等。各学科间互相渗透,相互补充才能使数字图象处理技术飞速发展,如最近的光学-电子学混合图象处理系统的发展很引人注目。

## 二、图象处理系统的介绍

常用的数字图象处理系统由几个主要部分组成,参看图1。现分别说明如下:

(1) 图象源 自然景物、照片、底片以及多光谱拍摄的照片、磁带等。

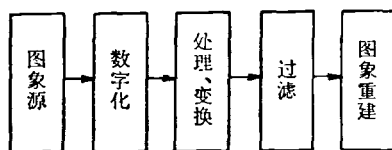


图1 数字图象处理系统

(2) 数字化 图象源先经光电变换器变成电信号,然后再进行数字化变换。把连续变化的电信号转换为便于计算机处理的数字化信号是由抽样、分层量化、编码等几个过程组成。抽样是在连续变化的信号上每隔一定距离抽取一个样本而得到的离散值。抽样间隔是根据图象处理任务中要求重新建立图象所需的分辨率来确定的。能够和广播黑白电视的质量相比拟的图象,需要水平方向抽样512个象点,垂直方向也要512条线,换句话说用 $512 \times 512$ 象点组成点阵图象。在某些用途中用 $256 \times 256$ 点阵就足够,而有些任务要求用 $1024 \times 1024$ 点阵以上。

(3) 分层量化 图象的每一个象点其亮度是按图象内容随机地变化的,把从最黑到最亮之间按其差别可分为许多层,一般的图象处理多分为256层,称为256级灰度。所分的层数与任务的要求有关,一旦所分的层数确定,则位于两层之间的亮度就用舍入的方法归入上一层或其下一层。以分为16层亮度的图象为例,设其亮度连续变化如图2所示。图中的亮度以纵坐标电压 $V$ 表示,横坐标为空间抽样距离 $x$ 。当图象在抽样点上的值为0.11, 0.92, 1.52, 1.08, 0.56, 0.28时,因为表示亮度的电压规定只分16层,因此只能用舍入

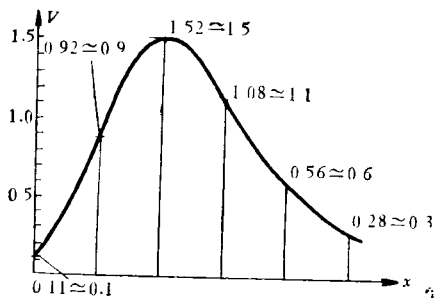


图 2 亮度分为 16 层的连续变化图象

的方法归入到相应的 16 层上去,即归入 0.1, 0.9, 1.5, 1.1, 0.6 和 0.3 上去,这样产生的误差称为量化误差。显然,分层越多则量化误差越小。

(4) 编码 每个抽样点上的亮度在计算机中用二进制码表之。仍以图 2 中的十六级灰度图象为例,用二进制数表示 16 级灰度以及用脉冲表示编码的波形示于图 3 中。图 3 中用顺序的脉冲波形表示图象的亮度,其中有脉冲表示“1”,无脉冲表示“0”。

数字	二进制码	数字的波形
0	0000	无脉冲
1	0001	第 4 位有脉冲
2	0010	第 3 位有脉冲
3	0011	第 3 位、第 4 位有脉冲
4	0100	第 2 位有脉冲
5	0101	第 2 位、第 4 位有脉冲
6	0110	第 2 位、第 3 位有脉冲
7	0111	第 2 位、第 3 位、第 4 位有脉冲
8	1000	第 1 位有脉冲
9	1001	第 1 位、第 4 位有脉冲
10	1010	第 1 位、第 3 位有脉冲
11	1011	第 1 位、第 3 位、第 4 位有脉冲
12	1100	第 1 位、第 2 位有脉冲
13	1101	第 1 位、第 2 位、第 4 位有脉冲
14	1110	第 1 位、第 2 位、第 3 位有脉冲
15	1111	第 1 位、第 2 位、第 3 位、第 4 位有脉冲

图 3

(5) 处理、变换 把亮度变成了二进制电脉冲之后就可以进行了。处理的方法一般分为两大类。第一类叫作空域处理,它是把图象空间上的每一个象点逐个进行处理变换。例如对图象进行灰度变换,就把每一个象点都按照某种准则(某种函数)进行变换,得到所需要的清晰图象。准则或函数则随不同的用途而异。第二类是频域处理,通常是用傅里叶变换把图象从空域变到频域之中,在频域中以某种准则改变其频谱分量,也就是常用的滤波处理,最后再变回到空域中成为所需要的清晰图象。

(6) 过滤 也叫作滤波,这是因为常用的正交变换是傅里叶变换,变到频域后就可以用滤波的方法选取频域中不同部分,如高通、低通带通、带阻、滤波。变换

后经过滤便于分类,或反变换后到空域成所需要的图象。

(7) 图象重建 处理后的图象是把象点逐点进行大量计算后再存于存储器中重新建立起图象。重建图象有许多方法随问题不同而异。供人观看时,常用电视屏幕来显示重建的图象。

### 三、数字图象的处理方法

图象处理的目的是使图象更清晰,使人或机器更易于理解。因此,为了不同目的就要采用不同的处理方法,有时还要采用几种处理方法的综合。

图象处理的内容极为广泛,如放大、缩小、平移,坐标变换,坐标轴旋转,透视图制作、位置重合,几何校正,  $r$  校正,灰度反转,二值图象,灰度变换,伪彩色增强、平滑,边缘加强和轮廓线抽取,等灰度线制作,图象复原,图象重建,局部图象选出或去除,轮廓周长计算,面积计算以及各种正交变换等,真是内容繁多举不胜举。为了更好地说明图象处理方法的本质及采用的基本手段,我们仅选择几个典型处理过程来说明两大类处理方法,即空域法和频域法的本质。

### 四、灰度级变换的图象增强

图象增强的目的是改进图象,使之适合于人的视觉理解或是突出某些图象特征以供机器自动识别。最常用的是空域增强和频域增强技术。灰度级变换是一种空域增强技术。把原始不清楚的图象  $R$  在空间每一象点灰度都经过某种变换函数转变成另一种灰度的象点,然后重新组合成一幅新灰度的图象  $S$ 。变换函数  $S = T(r)$  是根据不同的问题而选定的。其中  $r$  为原始已退化了的图象  $R$  中各象点的灰度,  $S$  是增强后图象  $S$  中各象点的灰度,并假定  $r$  和  $S$  都已经归一化,即  $0 \leq r \leq 1$  和  $0 \leq S \leq 1$ ,一般用 0 表示最暗, 1 表示最亮。几种典型变换函数表示在图 4 中。选用图 4(a) 中的变换准则,则原来图象中灰度位于  $r_1$  到  $r_2$  之间的象点变换后为  $S_1$  到  $S_2$  灰度之间,相当于把灰度拉开了,因此称为局部灰度扩展。同理,图 4(b) 称为暗区灰度扩展,图 4(c) 称为亮区灰度扩展。为了说明灰度变换

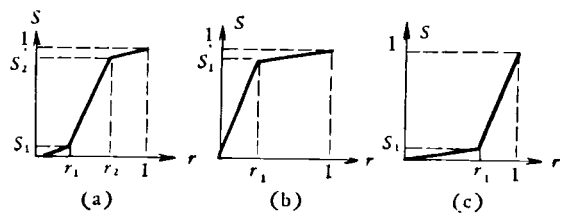


图 4 三种  $S = T(r)$  变换准则

的概念可用图 5 中的二值灰度图形为例。图 5(a) 左边为原始未经劣化的图形,图 5(a) 右边为各象点灰度统计的直方图。假定长期放置,图象变黑变暗如图 5(b)左边的样子,其各象点灰度分布直方图如图 5(b)右图。显然直方向暗区压缩,反差减小。要想增强这幅图象,可以选用图 5(c) 的变换函数,则经过变换后新的图象  $S$  如图 5(d) 的左图,其灰度分布直方图如图 5(d) 的右图。从这个例子可以看出增强的效果相当

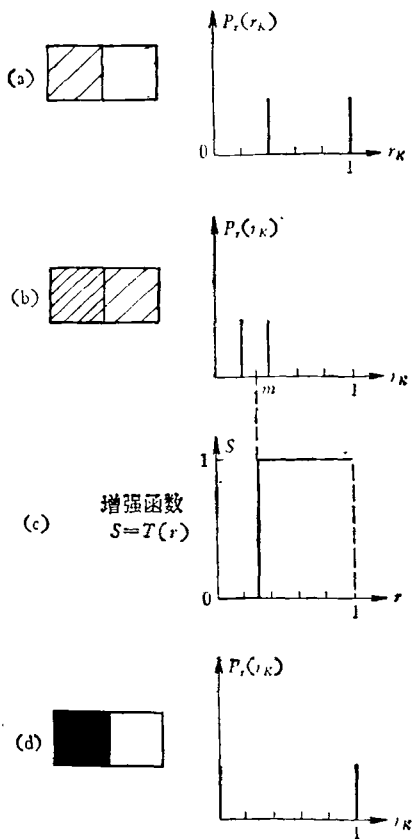


图 5 二值暗淡图象的增强

明显.实际上的图象都比较复杂,灰度分布直方图千变万化,要根据不同图象选用不同的变换函数.例如一般变暗淡的图象都是直方图压缩在暗区,最好选用图 4(b) 的暗区扩展的变换函数;如果直方图压缩在亮区就选用图 4(c) 的亮区扩展变换函数,这样在一般情况都能得到良好效果.应当指出这类处理都是在空域中进行的,其步骤是首先把这幅图象所有象点的灰度级都统计出来,得到这幅图象的灰度分布直方图,然后,把每一个象点的灰度级  $r$  按照变换函数转换为  $S$  灰度级,然后依次存入计算机的存储器中.最后,由显示器按照电视制度以每秒钟从存储器中把所有象点依次取五十次供屏幕的刷新显示.一幅  $256 \times 256$  的图象有  $64K$  个象点,每个象点都要经过存数、取数,统计、作

直方图,变换等操作,不用快速,大存储容量的计算机是难以达到的.

## 五、直方图均衡化法图象增强

从一幅复杂的劣化图象直接判断选用哪一种增强函数是很困难的,因此,实际上常用直方图均衡化方法增强图象.这个办法的关键是变换函数  $S = T(r)$  的获得,它是把劣化图象的象点灰度分布概率密度函数进行积分得到变换函数.然后用这个函数进行灰度变换.应当注意,变换后的灰度  $S$  也应按原规定的灰度应该分多少层来量化.用此法最后重建的图象的直方图比较均衡,原直方图中比较密集部分得到扩展而象点少的地方受到压缩.

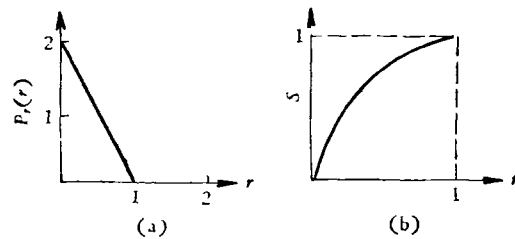


图 6 积分法求  $S = T(r)$  函数

设某幅劣化图象的灰度概率密度分布函数如图 6(a),通过积分得到  $S$  函数如图 6(b).图 6(a) 的数学表示式为

$$P_r(r) = \begin{cases} -2r + 2, & 0 \leq r \leq 1, \\ 0, & \text{其余}, \end{cases} \quad (1)$$

则

$$S = T(r) = \int_0^r (-2\omega + 2) d\omega = -r^2 + 2r. \quad (2)$$

在计算机计算时,(1)式、(2)式皆用如下的离散形式:

$$P_r(r_K) = \frac{n_K}{n}, \quad 0 \leq r_K \leq 1, \quad (3)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, L-1,$$

式中  $L$  为可分的灰度级,则

$$S_K = T(r_K) = \sum_{j=0}^K \frac{n_j}{n} = \sum_{j=0}^K P_r(r_j), \quad (4)$$

$$0 \leq r_K \leq 1, K = 0, 1, 2, \dots, L-1.$$

例如:设有  $64 \times 64$  象点的图象,并规定各象点都只用八个等级表示其灰度,现将其象点灰度级统计分布以及其它计算结果列于表 1 中.首先求出

$$S_K = \sum_{j=0}^K P_r(r_j).$$

$$\text{当 } K=0, S_0 = T(r_0) = \sum_{j=0}^0 P_r(r_j) \\ = P_r(r_0) = 0.19,$$

表 1 直方图均衡化计算举例

$r_k$	$n_k$	$P_r(r_k) = \frac{n_k}{n}$	$S_k = \sum_{j=0}^k P_r(r_j)$	$S'_k$	$n'_{s_k}$	$P_s(S_k)$
$r_0 = 0$	790	0.19	$S_0 = 0.19$	$S'_0 = \frac{1}{7}$	790	0.19
$r_1 = \frac{1}{7}$	1023	0.25	$S_1 = 0.44$	$S'_1 = \frac{3}{7}$	1023	0.25
$r_2 = \frac{2}{7}$	850	0.21	$S_2 = 0.65$	$S'_2 = \frac{5}{7}$	850	0.21
$r_3 = \frac{3}{7}$	656	0.16	$S_3 = 0.81$	$S'_3 = \frac{6}{7}$	985	0.24
$r_4 = \frac{4}{7}$	329	0.08	$S_4 = 0.89$	$S'_4 = \frac{6}{7}$		
$r_5 = \frac{5}{7}$	245	0.06	$S_5 = 0.95$	$S'_5 = 1$	448	0.11
$r_6 = \frac{6}{7}$	122	0.03	$S_6 = 0.98$	$S'_6 = 1$		
$r_7 = 1$	81	0.02	$S_7 = 1$	$S'_7 = 1$		

$$K = 1, S_1 = T(r_1) = \sum_{j=0}^1 P_r(r_j) = P_r(r_0) + P_r(r_1) = 0.19 + 0.25 = 0.44,$$

这样计算出  $S_0 \sim S_7$  值列于表 1。计算出的  $S$  值仍按原来八级灰度量化为  $S'_0 \sim S'_7$ 。从表 1 中还可看出  $r_0$  映射为  $S'_0$ ，因此其包括的象点都变为  $S'_0$  灰度，同理  $r_1, r_2$  分别映射为  $S'_1, S'_2$ ；但是  $r_3, r_4$  都映射为  $6/7$ ，因此  $r_3$  和  $r_4$  的象点皆变为  $6/7$ ；同理  $r_5, r_6, r_7$  皆映射为 1，故它们的象点皆赋予 1 的亮度。

直方图均衡化方法的效果很好，是很常用的一种图象增强方法。这种方法得出处理后图象的直方图比较均匀，以上面的计算为例，原来图象直方图很不均匀，象点集中在暗区，而处理后直方图较均衡，图象更为清晰。图 7 中表示出处理前后的两种直方图。其数据都可以从表 1 中得到。

## 六、图象的频域增强

一幅图象从频率的角度看，大的物体明暗变化反应在低频率，而细节和边缘变化反应在高频率。正常图象中高频、低频分量都有一定的比例，如果改变了这种比例就会使图象发生劣化。例如一幅正常图象通过一个低频通过型滤波器之后，则大的物体依然可见，但由于高频几乎都不能通过，因而细节和边缘都变成模糊。这样，这幅图象就劣化了。同理，一幅正常图象如果通过一个高频通过型滤波器，则会只剩下边缘和细

物理

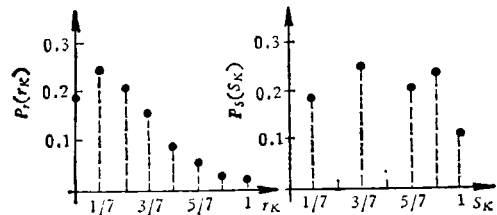


图 7 原直方图与均衡化直方图的比较

节，这也是一种劣化现象。应用频域中这些概念去处理图象是很常用的一类方法。一幅劣化的图象，如果是边缘模糊、细节不清，则可以用在频域中加强其高频分量的方法解决。改变频率分量的一般表示式是在频域图象表示式上乘上一个变换系数  $H(u, v)$ ，用来改变其高频低频的比例。这相当于  $H(u, v)$  对应在空中域中的  $h(x, y)$  与劣化的图象函数  $f(x, y)$  作卷积积分。但因为卷积积分计算较复杂，不如在频域中  $F(\cdot, \cdot)$  和  $H(u, v)$  直接相乘那样简单，因此在图象处理中常用频域法。频域法的数学表达式如下：

$$\text{空域 } g(x, y) = h(x, y) * f(x, y), \quad (5)$$

$$\begin{matrix} \updownarrow & \updownarrow & \updownarrow \\ \text{频域} & & \end{matrix}$$

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v), \quad (6)$$

式中  $f(x, y)$  为劣化图象函数； $h(x, y)$  为变换函数或叫滤波函数； $g(x, y)$  为改善后图象函数； $F(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 、 $G(u, v)$  为上面三个函数的傅里叶变换到频域的函数； $*$  为卷积符号； $\updownarrow$  为傅里叶变换或反变换符号。

频域处理的顺序是先把劣化的图象函数  $f(x, y)$

经傅里叶变换变到为频域  $F(u, v)$ , 选择合适的变换函数  $H(u, v)$  与  $F(u, v)$  直接相乘得到频域中改善了的形象函数  $G(u, v)$ , 最后用傅里叶反变换得到改善了的形象空域函数  $g(x, y)$ . 应该指出以上计算都是用其离散值进行计算的, 因此工作量是很大的.

实际的应用可以举出一般 X 光胸透视底片的处理为例, 首先图象经过频域处理中的高频增强, 使边缘和细节得到加强, 然后再经过直方图均衡化处理得到清晰的图象.

## 七、图象的平滑化

图象在传送过程中, 由于干扰可使之劣化. 例如卫星向地面传送图象中常遇到各种干扰, 如砂粒状点干扰或周期性细线干扰. 其中大多数可以用图象平滑化方法使之消除. 平滑化一般也可分为空域和频域两类方法.

### 1. 空域法

把图象中每一个象点都和其四周围象点平均, 将其平均值作为该点位置的数值. 其具体方法是用图 8(a) 所示的模板. 模板中的数值  $T_{k,i}$ ,  $i$  可以按要求选定. 图象中的任一个象点  $f(x, y)$  以及其周围八个象

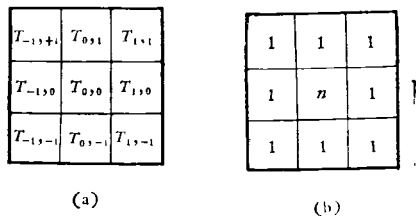


图 8 平滑化模板

点分别与模板中对应位置的  $T_{k,i}$  值相乘后总加起来, 再被象点总数除, 所得到的数值作为平滑后的象点  $g(x, y)$  之值, 即

$$g(x, y) = \frac{1}{9} [f(x, y) \cdot T_{0,0} + f(x-1, y)T_{-1,0} + f(x+1, y)T_{1,0} + f(x-1, y+1)T_{-1,1} + f(x, y+1)T_{0,1} + f(x+1, y+1)T_{1,1} + f(x-1, y-1)T_{-1,-1} + f(x, y-1)T_{0,-1} + f(x+1, y-1)T_{1,-1}]. \quad (7)$$

把模板按扫描顺序依次移动过去, 每移动一点都作这样计算作为该点的新值, 最后得到改善了的形象  $g(x, y)$ . 常用的  $3 \times 3$  模板的  $T_{k,i}$  值选定为图 8(b) 的值, 其中  $n$  值根据具体情况选择. 一般  $n$  的范围从 1—4, 当  $n=1$  时称为平均平滑;  $n>1$  时叫作加权平滑, 用加权平滑时的一般公式为

$$g(x, y) = \frac{1}{n+8} [nf(x, y) + f(x-1, y) + f(x+1, y) + f(x-1, y+1) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1) + f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + f(x+1, y-1)]. \quad (8)$$

平滑的方法有很多, 常用的是加权平滑. 显而易见, 平滑方法会把边缘搞模糊, 这时可选一个适当的门限值  $T$ , 使经过平滑模板处理后的  $g(x, y)$  与原始值  $f(x, y)$  相比较, 其差超过  $T$  时选用  $g(x, y)$  值, 不超过  $T$  值就仍保留  $f(x, y)$  值, 这样即能有效地消除尖峰干扰又不损坏图象边缘和细节.

### 2. 频域法

平滑就是在频域中改变上述的  $H(u, v)$ , 具体化就是加低通滤波器, 常用图 9 中所示的指数型或梯型低通滤波器把高频滤去以消除尖峰干扰. 由于高频分量中即包括干扰又包括边缘和细节, 因此适当选择滤波器的截止频率  $D_0, D_1$  是很重要的, 否则高频消除太多会损坏图象的细节和边缘.

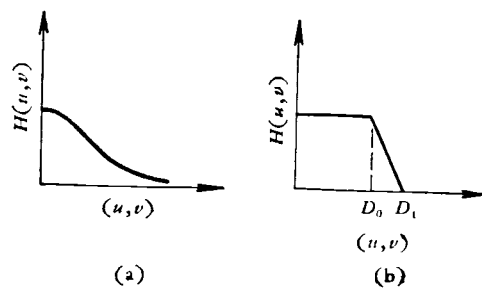


图 9 指数型与梯型滤波器

## 八、边缘增强和轮廓抽取

加强图象边缘不但图象显得清楚, 而且易于被人或机器所理解. 同时抽取轮廓是判断图象性质的重要依据, 例如, 在军事上判断导弹、机、舰的型号和战斗力往往依靠轮廓特征. 空域法是找出图象的亮度在空间的分布和变化. 图象  $f(x, y)$  的梯度矢量

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其幅值为

$$G[f(x, y)] = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

计算机中计算用离散值, 其幅值为

$$G[f(x, y)] = \{ [f(x, y) - f(x+1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y+1)]^2 \}^{1/2}. \quad (11)$$

同理,用频域法加强边缘,抽取轮廓也是在频域中选合适的  $H(u, v)$  函数,实际上作一个高频通过型滤波器突出边缘,抽取轮廓此处不多讲了。

## 九、灰度窗口处理——等值线绘制

这是一种常用的图象处理方法,它可以在灰度级分成几百级至几千级的图象中任意抽出某一级灰度或某一段灰度的图象拿出来显示。这好比把灰度范围开一个窗口,窗口可大可小,使通过窗口的灰度范围显示出来。因为同一种材料、同一种物质,其灰度级相等的可能性比较大,因此突出某一级灰度不但能突出该物质而且还便于计算形状的轮廓周长和面积。这种方法用于区分显微镜细胞,区分放射尘埃,以及冶炼中金相分析判断合金质量等。

用计算机作灰度窗口处理只需加一些简单的硬件,我们以灰度从 0—255 级的图象为例,通过窗口后

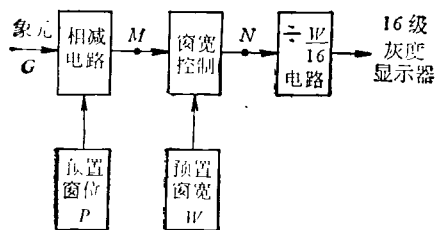


图 10 灰度窗口处理电路

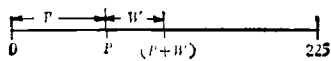


图 11 灰度窗口示意图

以 16 级灰度来显示的电路如图 10 所示。图中象点是逐个进入此电路进行处理。原来图象各象点是随机地出现 0—255 级之间任一级灰度。如果我们感兴趣的是在某一灰度  $P$  以上的一段灰度  $W$  拿出来用 16 级灰度显示,此时  $P$  称为窗位,  $W$  称为窗口。灰度窗口示意图见图 11。在图 11 中看出只允许落在  $W$  当中的象点  $G$  才能通过此电路去显示。参看图 10, 每一个象点  $G$  串行依次进入相减电路与预置窗位相减,  $M$  点信号为  $(G - P)$ , 但不一定落在  $W$  当中, 经窗宽控制到达  $N$  点的信号, 这个信号为  $(G - P)$ , 并恰好落在  $W$  当中。由于最后用 16 级灰度显示, 故再除一个比例因数  $\frac{W}{16}$ , 输出到 16 级灰度显示器上去。也可以送到用 16 种人工指定的彩色显示, 称为伪彩色显示。当用伪彩色 16 级显示器时, 如  $W = 16$ , 则恰好每一种颜色表示一级灰度, 显出等灰度线。灰度窗口可以用于模式识别中的灰度分割。

本文介绍了与科学实验密切相关的数字图象处理方法的基本原理。其它较专门的图象处理技术请参阅有关文献。

## 参 考 文 献

- [1] R.C.Gonzalez, P.Wintz "Digital Image Processing", Addison-Wesley Reading, (1977).
- [2] H. C. Andrews, "Tutorial and Selected Papers in Digital Image Processing", N. Y. IEEE, (1978).
- [3] B. R. Hunt, *PIEEE*, 64-4(1975), 693.
- [4] K. S. Fu, A. Rosentfeld, *IEEE Trans on Computers*, C-25-12, (1976), 1336.
- [5] 日本物理学会, 计算机による物理実験データ処理, サイエンス社, (1974), 81.
- [6] 森健一, 电子通信学会誌, 50-11, (1976), 1201.
- [7] D. A. O'Handley, W. B. Green, *PIEEE*, 60-7, (1972), 821.

# 高临界温度超导体的探索

吉光达 赵忠贤

(中国科学院物理研究所)

本文将在[1], [2]的基础上进一步介绍探索高温超导体的有关问题。第一节介绍电子-声子机构的有关问题。第二节介绍界面超导性、非晶态材料超导性和颗粒超导性等一些目前感兴趣的问题。第三节介绍激子超导性。第四节介绍其它新机构。

## 一、电子-声子机构超导性

关于超导电性的理论是基于如下认识: 金属中处于费密面附近具有相反动量和自旋的两个电子, 由于和晶格之间相互作用而互相吸引, 形成电子对, 结果在临界温度  $T_c$  之下金属呈超导电性。因为晶格振动是