



吴维聪 编著

计算机图像处理



上海科学技术出版社

上海

391.41

WC/1

版社

计算机图像处理

吴维聪 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了图像处理的基础理论和各种处理技术。全书共分八章,内容包括:量化和采样;图像信息的编码压缩;图像增显;图像修复;投影建像;图像划分;景物描述等。同时也涉及了在计算上实现的方法和用 FORTRAN 和 BASIC 语言编制的一些运算程序实例。本书很大一部分内容是反映近年来国内外在图像处理方面的新技术。

本书内容新颖,实例典型,可作为大专院校计算机科系的学生和研究生的教材,亦可作为从事计算机图像处理专业人员的参考书。

计 算 机 图 像 处 理

吴维联 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行

上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 260,000

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数 1-7,000

ISBN 7-5323-0392-6/TP·7

定价: 4.05 元

前 言

本书是根据图像处理模式识别研究室和图像处理教学组的科研成就和教学经验的基础上编写而成。主要论述了图像处理的基础理论和各种处理技术以及在计算机上实现的处理方法和用 FORTRAN 或 BASIC 语言编制的一些运算程序实例。本书试图从这里介绍的一些基本计算程序使读者可以较为省时省力地开拓图像处理新的思路。读者通过阅读本书能够明确概念,掌握这方面的各种基本技术和上机操作技巧。

本书在编写过程中,得到了我室教师和学生们的热情支持,他们也参加了一些计算机处理程序编制工作,编者特此表示谢意。由于编者的水平有限,书中错误与缺点在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

1988 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 基础理论	2
第三节 二维抽样理论	6
第四节 照相胶片的性质	8
第二章 量化和采样	11
第一节 采样	11
第二节 采样混叠	15
第三节 正交函数采样	17
第四节 量化采样	19
第三章 图像信息的编码压缩	23
第一节 像源的随机模型	23
第二节 图像质量测量	24
第三节 图像编码技术	26
第四节 预测图像编码	31
第五节 变换编码	37
第四章 图像增显	42
第一节 传递函数	42
第二节 分辨率与陡削度	44
第三节 改变图像的灰度级	45
第四节 假彩色增显	51
第五节 几何矫正	52
第六节 图像锐化	55
第七节 图像噪声的处理	60
第五章 图像修复	64
第一节 修复过程	64
第二节 代数法图像修复	68
第三节 反向滤波器	69
第四节 分析法求模糊函数	70
第五节 维纳滤波器	73
第六章 投影建像	78
第一节 三维成像原理	78
第二节 代数运算方程	82

第三节	重构图像的滤波器设计	85
第四节	重构图像的显示	87
第五节	放射医学应用	88
第七章	图像划分	93
第一节	阈值划分	93
第二节	灰度阈值的选定	94
第三节	界线检测	98
第四节	图像匹配	101
第八章	景物描述	107
第一节	立体景物表示法	108
第二节	形状分析	112
第三节	深度测量	114
第四节	模式分类方法	120
附录		
一、	图像处理的数学和实验基础	122
二、	计算程序实例	130
三、	快速傅里叶变换	161
四、	循环矩阵	167

第一章 绪 论

第一节 引 言

图像处理是一门新兴的学科,从六十年代起,由于电子计算机的发展,这门科学得到了有力的支持,使它蓬勃地发展于气象工程、遥感技术、医学、物理、化学、生物、通信工程等等科学和工程的领域中。目前,在我国,它被应用于上述提到的各个科学领域里也正方兴未艾,例如上海气象研究所在天气预报中把从气象卫星收到的信息,用伪彩色构成气象云图,大大地提高了图中的层次结构。图 1-1 示出了图像处理前后对照图。

“图像处理”原是物理学中光学的一个颇为实用的分支。近代已发展到电气工程的领域并和计算机紧密联系着。光学理论和电气的通信理论及信息理论的联系越来越紧密,因为

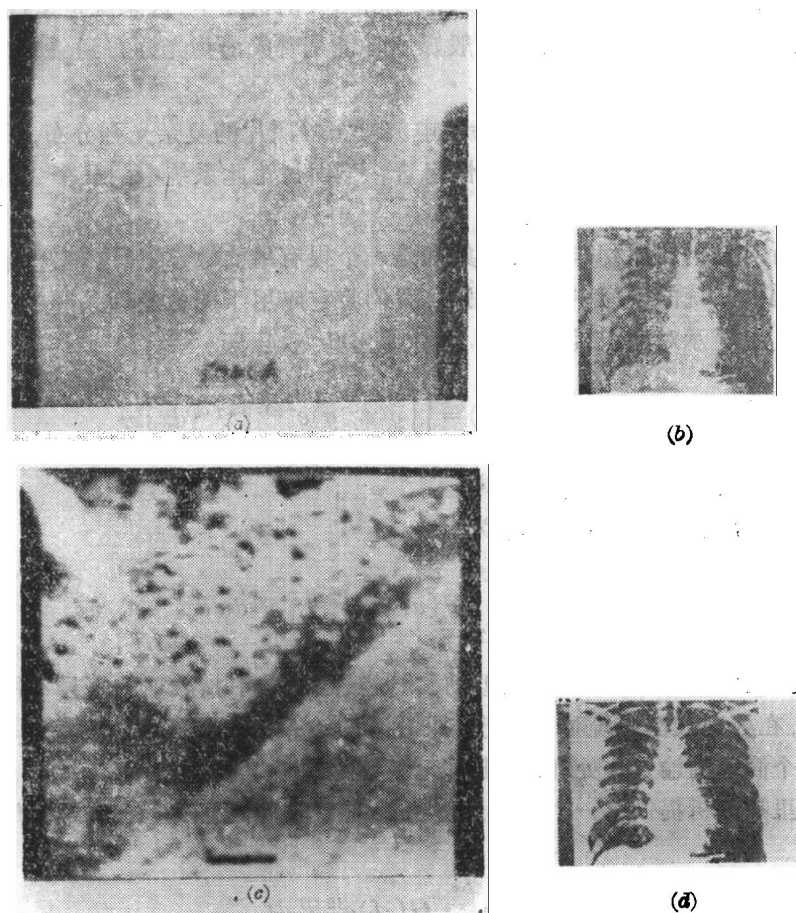


图 1-1 图像处理前后对照图

(a) 电镀下蛙的卵黄细胞; (b) 胸透片; (c) 及 (d) 是 (a) 及 (b) 经过处理后的图片

通信系统和光学成像系统都是用来收集或传递信息的。只是通信系统处理的信息是时间性的。这两门科学我们都可以用同样的数学方法,如傅里叶分析和“系统理论”来描写。这是因为通信系统和成像系统都具有某些相同的基本性质。例如,它们在数学上都可用频谱分析方法来描述,因为电气网络和成像装置都具有线性和移不变性,正象对一个电信号放大器可用它的时间频率响应来描述,一个成像系统可用它的空间频率响应来描述。又如某些非线性光学元件,如照片底片,它的输入输出关系和非线性电子管的相应特性很相似,就可以用同样的数学分析方法来处理。一个时间函数的频谱可以按规定方式加以改变,一个空间函数的频谱也可以按照要求的方法加以改变,如在图像处理中的各种反差增强技术,图像修复技术,光学匹配滤波器等。因此对从事计算机技术的学者来说,进行图像处理这门科学的研究就特别方便。

第二节 基 础 理 论

首先讨论一个在图像处理领域中常用到的基本性质——线性性质。它就是几个激励同时作用于一个系统的响应恒等于每一激励对系统单独引起的响应的总和,正如在电阻、电容、电感等元件所组成的网络中,当在输入信号相当大的情况下,这系统是呈线性的性质,与此对应,在光学成像过程中,当光通过一般媒质时也是看成由物光分布到象光分布的一个线性变化。

因此,在一个线性的系统中,如复杂的电波或一幅照片的复杂光强分布,我们可以把复杂激励的响应分解成各个基元激励的线性组合。下面讨论此系统中的一个二维傅里叶分析。

傅里叶分析对分析线性和非线性现象都是一个很有用的数学工具。它曾被广泛地应用于电气网络和通信系统的研究中,在本书中,我们将它应用于图像处理系统中。

我们用 $\mathcal{F}\{g\}$ 表示对两组函数 $g(x, y)$ 作傅里叶变换,即

$$\mathcal{F}\{g\} = G(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$$

$\mathcal{F}\{g\}$ 也是 u, v 的复函数, u, v 称为频率。

$G(u, v)$ 的逆傅里叶变换 $\mathcal{F}^{-1}\{G\}$ 为:

$$\mathcal{F}^{-1}\{G\} = \iint_{-\infty}^{\infty} G(u, v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv$$

在运算中,变换和逆变换在形式上是相似的,只是被积函数中指数项的符号不同。

前已述及,在处理线性系统时,常把一个复杂的输入分解成许多较简单的输入,然后计算系统对每一个简单的输入作处理,得出单元函数的响应,再把这些单个响应迭加起来,得到总响应。傅里叶分析提供了一个实行这种分解的手段。例如,一个一维的傅里叶逆变换式:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df$$

它把一个时间函数 $g(t)$ 通过其频谱 $G(f)$ 表示出来。我们把函数 $g(t)$ 分解成许多单元函数

的线性组合, 上式积分号中的每个单元函数的具体形式为 $e^{j2\pi ft}$, 我们常称它为核。复数 $G(f)$ 是一个加权因子, 把它加到频率为 f 的单元函数上来算出我们要求的 $g(t)$ 。

同样, 我们把二维傅里叶变换看成是把函数 $g(x, y)$ 分解成 $e^{j2\pi(uv)}$ 的单元函数的线性组合形式。

一、傅里叶变换定理

现在我们引出傅里叶变换的几个基本数学性质。这些性质在以后的内容中将会得到广泛的应用。

1. 线性定理

在一个系统中,

$$\mathcal{F}\{\alpha g(x, y) + \beta h(x, y)\} = \alpha \mathcal{F}\{g(x, y)\} + \beta \mathcal{F}\{h(x, y)\}$$

即两个函数之和的傅里叶变换就是它们各自变换之和。

2. 相似性定理

若系统存在 $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(u, v)$, 则

$$\mathcal{F}\{g(ax, by)\} = \frac{1}{|ab|} G\left(\frac{u}{a}, \frac{v}{b}\right)$$

即空域中坐标 (x, y) 的“扩展”, 导致频域中坐标 (u, v) 的压缩以及在整个频谱幅度上的一个变化。

3. 相移定理

若系统存在 $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(u, v)$, 则

$$\mathcal{F}\{g(x-a, y-b)\} = G(u, v) e^{-j2\pi(ua+vb)}$$

即函数在空域中的平移, 带来频域中的一个线性相移。

4. 巴斯瓦尔定理

若系统存在 $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(u, v)$, 则

$$\iint_{-\infty}^{\infty} |g(x, y)|^2 dx dy = \iint_{-\infty}^{\infty} |G(u, v)|^2 du dv$$

此式可看作能量守恒的表述。

5. 卷积定理

若系统存在

$$\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(u, v)$$

及 $\mathcal{F}\{h(x, y)\} = H(u, v)$, 则

$$\mathcal{F}\left\{\iint_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta) h(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta\right\} = G(u, v) H(u, v)$$

即空域中的两个函数的卷积等效于它们各自的变换式相乘。

6. 自相关定理

若系统存在 $\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(u, v)$, 则

$$\mathcal{F}\left\{\iint_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta) g^*(\xi-x, \eta-y) d\xi d\eta\right\} = |G(u, v)|^2$$

或

$$\mathcal{F}\{|g(\xi, \eta)|^2\} = \iint_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta) G^*(\xi+u, \eta+v) d\xi d\eta$$

此定理可作为卷积定理的一个特例。

7. 傅里叶积分定理

在函数 $g(x, y)$ 的各个连续点上存在

$$\mathcal{F}\mathcal{F}^{-1}\{g(x, y)\} = \mathcal{F}^{-1}\mathcal{F}\{g(x, y)\} = g(x, y)$$

在函数 $g(x, y)$ 的各个间断点上, 这样两次相继的变换给出该点的一个小邻域内 g 的角向平均值, 也就是除在间断点外, 对函数相继进行变换和逆变换又重新得出该函数。

有了这些定理, 在解决傅里叶分析问题就能节省大量的计算工作量。

二、分离变量的函数

所谓分离变量的函数是一个两元函数(在某坐标系内)能写成两个一元函数的乘积, 这个两元函数在坐标系中是可分离的。因此, 在直角坐标系中, 若

$$g(x, y) = g_x(x)g_y(y)$$

则函数 $g(x, y)$ 是可分离的。又若在极坐标中, $g(r, \theta) = g_r(r)g_\theta(\theta)$, 则函数 $g(r, \theta)$ 是可分离的。这种可分离性使复杂的二维计算可简化为简单的一维计算。例如, 一个在直角坐标系中的可分离函数的二维傅里叶变换式就是两个一维傅里叶变换式的乘积:

$$\begin{aligned}\mathcal{F}\{g(x, y)\} &= \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g_x(x) e^{-j2\pi ux} dx \int_{-\infty}^{\infty} g_y(y) e^{-j2\pi vy} dy = \mathcal{F}_x\{g_x\} \mathcal{F}_y\{g_y\}\end{aligned}$$

这样, $g(x, y)$ 的变换式本身也可分离成两个因子的乘积, 一个因子是 u 的函数, 另一个因子是 v 的函数, 因而, 二维的变换过程就可简化为一系列一维的计算。

三、线性系统

所谓“系统”就是指一个电网络, 也可指一套光学成像装置, 我们也可定义它为一个“变换”。它将一组输入函数变换成一组输出函数。对电网络而言, 输入和输出都是一个一维的时间变量的电压或电流实函数; 对于成像系统来说, 输入和输出是一个二维的空间变量的光强度实函数, 也可以是复函数的场振幅。

我们用算符“ $\mathcal{S}\{\}$ ”作用在输入函数上以产生输出函数。如果函数 $g_1(x, y)$ 表示一个系统的输入, 而 $g_2(x_2, y_2)$ 表示相应的输出, 则

$$g_2(x_2, y_2) = \mathcal{S}\{g_1(x_1, y_1)\}$$

如果一个系统的两个输入函数 t 和 s 和它们的复常数 a 和 b 都有下述叠加性质:

$$\mathcal{S}\{as(x_1, y_1) + bt(x_1, y_1)\} = a\mathcal{S}\{s(x_1, y_1)\} + b\mathcal{S}\{t(x_1, y_1)\}$$

则此系统是一个线性系统。线性系统可以对任意输入的响应, 用输入的各个分“单元”函数的响应来表示。因此找一个简便的方法来分解一个输入函数。我们常利用 δ 函数的筛选性质来完成这个方法。根据 δ 函数的这一性质有:

$$g_1(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta$$

这个方程可把 $g_1(x, y)$ 看成是一带有加权的并移动位置的许多 δ 函数的线性组合。这些 δ

函数就是前述被分解的“单元”函数。

系统对应于输入 g_1 的输出响应为

$$g_2(x_2, y_2) = \mathcal{S} \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta \right\}$$

式中 $g_1(\xi, \eta)$ 是一个加在元函数 $\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)$ 上的一个加权因子。按线性性质，我们把算符 $\mathcal{S}\{\}$ 作用到各个元函数上，得到

$$g_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \eta) \mathcal{S}\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} d\xi d\eta$$

我们用 $h(x_2, y_2; \xi, \eta)$ 表示一个系统在输出平面上的点 (x_2, y_2) 上的输出响应，它对应于输入平面坐标 (ξ, η) 上的 δ 函数输入。所以

$$h(x_2, y_2; \xi, \eta) = \mathcal{S}\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\}$$

函数 h 称为这系统的脉冲响应。系统的输入和输出可以用下述方程联系起来：

$$g_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \eta) h(x_2, y_2; \xi, \eta) d\xi d\eta$$

此式说明：一个线性系统的性质完全可用它对单位脉冲的响应来表征。我们知道了系统中输入平面上所有点的脉冲响应，就可确定系统的输出。再则，对于一个线性成像系统，如果确定了物场中各点上的点光源的象，就可以很好地描述如透镜，光栏等的作用功能。

四、传递函数

现在讨论一个移不变线性系统。所谓移不变线性系统的物理意义举例说明如下：如果一个电网络的脉冲响应 $h(t; \tau)$ ，即这个网络在 t 时刻对应于 τ 时刻加给它的单位脉冲激励的输出响应只依赖于时间之差 $(t - \tau)$ ，则称它是时间不变的。由固定的电阻、电容和电感所组成的电网络是时间不变的，因为它们的特性并不随时间变化。如果一个线性成像系统是空间不变的，那么它的脉冲响应 $h(x_2, y_2; \xi, \eta)$ 只依赖于距离 $(x_2 - \xi)$ 及 $(y_2 - \eta)$ 。所以这系统具有

$$h(x_2, y_2; \xi, \eta) = h(x_2 - \xi, y_2 - \eta)$$

的性质，因此，当一个点光源在物场中移动时，若点光源的像只改变位置而不改变它的函数形式，则此成像系统是空间不变的。

对于不变系统，叠加积分有特别简单的形式

$$g_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} g_1(\xi, \eta) h(x_2 - \xi, y_2 - \eta) d\xi d\eta$$

它是物函数与系统的脉冲响应的一个二维卷积。用

$$g_2 = g_1 * h$$

表示。式中 $*$ 表示卷积。如果对上式两边作傅里叶变换并应用卷积定理，则系统的输出频谱 $G_2(u, v)$ 和输入频谱 $G_1(u, v)$ 有下述关系：

$$G_2(u, v) = H(u, v) G_1(u, v)$$

式中 H 是脉冲响应的傅里叶变换式，即

$$H(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(\xi, \eta) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta$$

函数 $H(u, v)$ 称为系统的传递函数, 它表示系统在“频域”中的响应。我们还可看出, 对于这个不变线性系统的输入函数可以分解成比 δ 函数更为合适的其他元函数, 如复指数函数。对 g 作变换, 也就是把输入分解成具有不同空间频率 (u, v) 的复指数函数。输入频谱 G_1 与传递函数 H 相乘就相当于求出了这系统对每一个元函数的效用。这些效用只限于振幅的变化和相角的移动。这是因为我们把输入频谱的每一频率 (u, v) 乘了一个复数 $H(u, v)$ 。我们把输出频谱 G_2 作逆变换, 也就是把改变后的元函数加起来合成一个输出 g_2 。

第三节 二维抽样理论

为了处理图像的数据和进行数学分析, 对于一个函数 $g(x, y)$, 我们用它在 (x, y) 平面内的各个独立点集上的抽样值所组成的列阵(矩阵)来表示。显然, 如果这些抽样点取得彼此很靠近, 那末, 我们认为这些抽样数据就是原函数的精确表示, 因为通过简单的内插就能相当精确地使 g 重现。

对于函数 g 的矩形格点上的抽样, 可由下列公式定义:

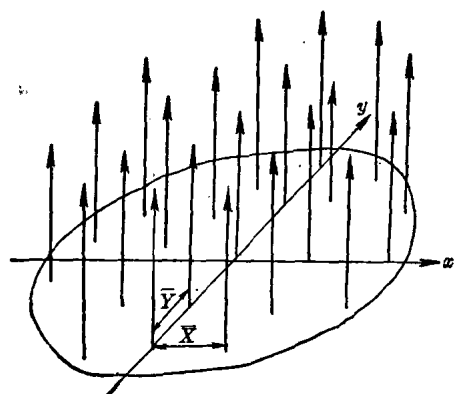


图 1-2 抽样函数

$$g_s(x, y) = \text{comb}\left(\frac{x}{X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{Y}\right) g(x, y)$$

抽样函数 g_s 由 δ 函数的阵列组成。各个 δ 函数之间的距离在 x 方向上为 X , 在 y 方向上为 Y , 如图 1-2 所示。每个 δ 函数下的面积正比于在函数 g 的方格点阵中的这一特定点的值。卷积定理指出, g_s 的频谱 G_s 可以从函数 $\text{comb}\left(\frac{x}{X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{Y}\right)$ 的变换式与函数 g 的变换式的卷积求出, 即

$$G_s(u, v) = \mathcal{F}\left\{\text{comb}\left(\frac{x}{X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{Y}\right) * G(u, v)\right\}$$

查表和根据相似定理

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\left\{\text{comb}\left(\frac{x}{X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{Y}\right)\right\} &= XY \text{comb}(Xu) \text{comb}(Yv) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(u - \frac{n}{X}, v - \frac{m}{Y}\right) \end{aligned}$$

因此, 抽样函数的频谱为

$$G_s(u, v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} G\left(u - \frac{n}{X}, v - \frac{m}{Y}\right)$$

这样, 我们很简单就可求出 g_s 的频谱。这就相当于把 g 的频谱放在 u, v 平面中的环绕点 $\left(\frac{n}{X}, \frac{m}{Y}\right)$ 的每一个小区上, 如图 1-3 表示。

假定 g 是有界频带的函数, 即它的频谱 G 只有在一个有限区域 R 的频率空间上不等于零, 那末我们在频率平面内可以环绕每一个点 $\left(\frac{n}{X}, \frac{m}{Y}\right)$ 划出一个小区 R 而得到抽样函数的频谱不为零的区域。显然, 如果 X 和 Y 足够小, 即抽样点间的距离很近, 那末, 各个频谱区域的间隔 $\frac{1}{X}$ 和 $\frac{1}{Y}$ 就会足够大, 保证了相邻的区域不会重叠。于是, 从 G_s 可以绝对精确地恢

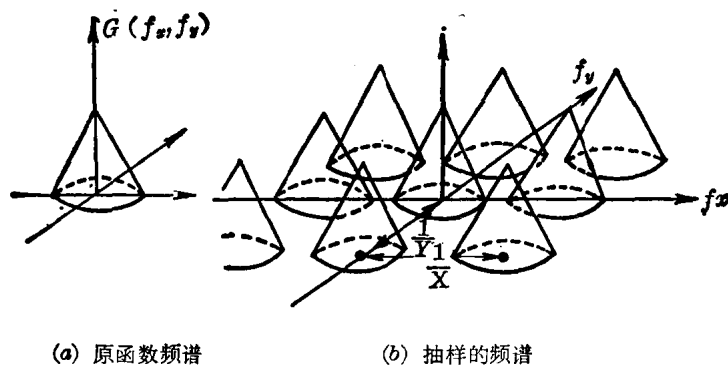


图 1-3 原函数与抽样的频谱

复原来的频谱 G 。我们让抽样函数 g_s 无畸变地通过这样的一个滤波器, 这个滤波器只允许传递方程

$$G_s(u, v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} G\left(u - \frac{n}{X}, v - \frac{m}{Y}\right)$$

中的零级项 ($n=0, m=0$) 通过而同时阻挡所有其他各项。在这滤波器的输出端, 得到了绝对准确的原始数据 $g(x, y)$ 的再现。

因此, 为了很好地恢复原始数据, 抽样点必须足够地靠近, 以便 G_s 的各个频谱区域充分分开。为了确定抽样点之间的最大容许间距, 令 $2B_x$ 和 $2B_y$ 分别表示包围区域 R 在 u 和 v 方向上最小矩形的宽度。抽样数据的频谱中的各项在 u 和 v 方向上相隔的距离分别为 $\frac{1}{X}$ 和 $\frac{1}{Y}$ 。要把各频谱区域分开, 必须满足

$$X \leq \frac{1}{2B_x} \quad \text{和} \quad Y \leq \frac{1}{2B_y}$$

的条件。因此要完全恢复原来的函数, 则抽样点阵的最大间距必须为 $(2B_x)^{-1}$ 和 $(2B_y)^{-1}$ 。

进行图像抽样时, 在满足上述条件的同时还需要列出能够让抽样值通过滤波器的准确的传递函数。针对不同形式的区域 R , 有不同的各种传递函数。这些传递函数只通过 G_s 的 ($n=0, m=0$) 项而阻挡所有其他各项。不管 R 的形状如何, 只要满足抽样点的最大间距的条件, 即 $x \leq \frac{1}{2B_x}$ 及 $y \leq \frac{1}{2B_y}$, 就会存在一个传递函数, 它将给出所要求的结果。也就是说, 当

$$H(u, v) = \text{rect}\left(\frac{u}{2B_x}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{2B_y}\right)$$

时, 就能从 G_s 完全复原出 G , 因为这个滤波器的输出频谱是:

$$G_s(u, v) \text{rect}\left(\frac{u}{2B_x}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{2B_y}\right) = G(u, v)$$

在空域中相应于上式的等式为

$$\left[\text{comb}\left(\frac{x}{X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{Y}\right) g(x, y) \right] * h(x, y) = g(x, y)$$

式中 $h(x, y)$ 是滤波器的脉冲响应函数:

$$h(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{u}{2B_x}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{2B_y}\right) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv$$

$$= 4B_x B_y \text{sinc}(2B_x x) \text{sinc}(2B_y y)$$

由于

$$\text{comb}\left(\frac{x}{X}\right) \text{comb}\left(\frac{y}{Y}\right) g(x, y)$$

$$= XY \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(nX, mY) \delta(x - nX, y - mY)$$

所以

$$g(x, y) = 4B_x B_y XY \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(nX, mY) \text{sinc}[2B_x(x - nX)]$$

$$\times \text{sinc}[2B_y(y - mY)]$$

令采样间距 X 和 Y 取它们的最大容许值

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} g\left(\frac{n}{2B_x}, \frac{m}{2B_y}\right) \text{sinc}\left[2B_x\left(x - \frac{n}{2B_x}\right)\right]$$

$$\cdot \text{sinc}\left[2B_y\left(y - \frac{m}{2B_y}\right)\right]$$

上式称为魏塔克-萧农采样定理。它说明：从一个符合间隔条件的采样矩阵，可以完全准确地复原一个限带函数；我们只要在每一个采样点上加一个由 sinc 函数的乘积所构成的内插函数，就得到复原了。但是，在这个采样定理中，我们作了两种假设，即采用了方形的采样格点和选择了特定的传递函数

$$H(u, v) = \text{rect}\left(\frac{u}{2B_x}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{2B_y}\right)$$

第四节 照相胶片的性质

一、曝光过程

一张未经曝光的胶片是由大量微小的卤化银晶粒悬浮在明胶衬底上构成，明胶衬底又附着在一层“片基”上，片基的材料是醋酸盐。当感光材料曝光时，卤化银晶粒吸收光能，那些吸收足够光能的晶粒就出现金属银小斑而形成显影中心，然后，把曝过光的胶片进行显影。在每一个微小的显影中心，这些小斑析出卤化银晶粒，析出的银粒就沉积下来，而不含显影中心的晶粒则不发生变化。胶片再经过“定影”，去掉剩余的卤化银晶粒，金属银粒在可见光照射下是不透明的。所以显影后的胶片的不透明度将取决于透明片上各个区域中的银柱密度。

二、H-D 曲线

胶片接受的曝光量 E 定义为：入射到一点感光表面上的单位面积的能量，即

$$E = I_\lambda T$$

式中 I_λ 为入射光强度； T 为曝光时间。

显影后，透明片的光强度透射率 $\tau(x, y)$ 定义为：

$$\tau(x, y) = \left\{ \frac{\text{在点}(x, y)\text{的透射光强 } I_{\text{透}}}{\text{在点}(x, y)\text{的入射光强 } I_\lambda} \right\}$$

的区域平均,区域平均在下述面积条件下进行,即这一面积要比胶片的晶粒面积大,但比透射光强使其中明显变化的面积小。我们把照片密度 D 定义为:

$$D = \lg \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

式中 $\lg \left(\frac{1}{\tau} \right)$ 与显影后透明片的单位面积上的含银量成正比。照相胶片的感光性能,常用照片密度和曝光量的对数之间的关系曲线来表示,如图 1-4 所示。当曝光量低于某定值时,密度与曝光量无关,且等于一极小值,称为灰雾。在曲线的下拐点起始部分,密度与曝光量的对数成线性关系。这一线性区域的曲线斜率称为胶片的 γ 值。曲线到上拐点呈饱和状态,这时,增加曝光量不会引起密度的变化。

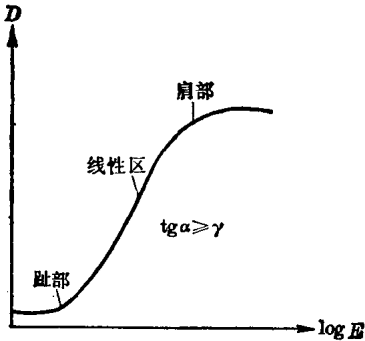


图 1-4 H-D 曲线

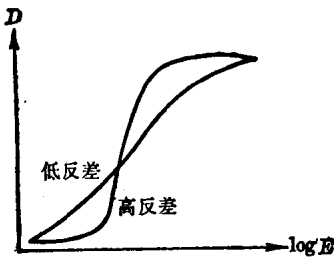


图 1-5 高、低反差胶片的 H-D 曲线

H-D 曲线的线性区域是照相术中常用的部分, γ 值大的胶片称为高反差胶片, γ 值低的则称为低反差胶片。图 1-5 示出了高、低反差胶片的 H-D 曲线。 γ 值取决于下列三个因素: (1) 乳胶的类形, $\gamma < 1$ 的是低反差胶片, $\gamma = 2 \sim 3$ 的为高反差胶片; (2) 所用的显影剂; (3) 显影时间。图 1-6 示出了 γ 值对应于显影时间的关系曲线。如果胶片、显影剂和显影时间选得合适,就能相当精确地得到预定的 γ 值。

三、胶片作为感光元件

实际上胶片是一个把入射光强分布 I_λ 变换为显影后的透射光强分布 I_λ 的元件。当胶片处在 H-D 曲线的线性区段中使用时,密度 D 为:

$$D = \gamma_n \lg E - D_0 = \gamma_n \lg (I_\lambda T) - D_0$$

式中 γ_n 是曲线线性段的斜率; D_0 是假设曲线没有下拐点时, 直线延线与 D 轴相交点的 D

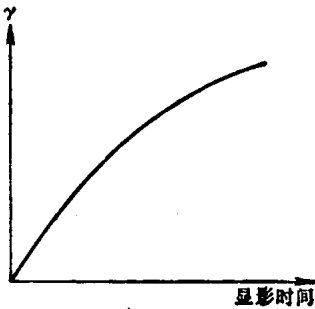


图 1-6 胶片的 γ 与显影时间的关系

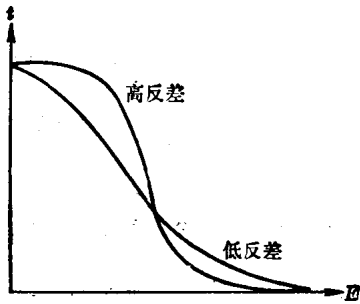


图 1-7 高、低反差的胶片的透射率-曝光量曲线

值: γ 的下标 n 表示是负透明片。

将照片密度 $D = \lg\left(\frac{1}{\tau_n}\right)$ 代入上式得:

$$\lg \tau_n = -\gamma_n \lg(I_\lambda T) + D_0$$

移项整理得:

$$\tau_n = 10^{D_0} (I_\lambda T)^{-\gamma_n}$$

$$\tau_n = K_n I_\lambda^{-\gamma_n}$$

式中 K_n 是正常数。此式表示曝光期间的入射光强和显影后的光强透射率间的关系。从这里看到光强度的变换是非线性的。

图 1-7 示出了高、低反差胶片的透射率与曝光量的关系。从图中可知, 高反差曲线有更陡的斜率, 因此更有效地把微小变化的曝光量转换成透射率的变化。但是它的 $t-E$ 曲线的线性动态范围就比较小。最大动态范围的偏置点一般应在相应的 H-D 曲线的下拐处。

下面讨论胶片的截止空间频率。在胶片的任一小区, 受到的曝光量的变化, 将按乳胶的 H-D 曲线转换成对应的照片密度的变化。但是当曝光量变化的空间区域过小时, 胶片上可能不会发生相应的密度变化。我们就说, 它具有一定的截止空间频率效应。

为了测量胶片的特性, 我们用余弦型曝光量公式

$$E = E_0 + E_1 \cos 2\pi u$$

它的“调制度”定义为: 曝光量变化的峰值 E_1 与本底曝光量 E_0 的比值, 即

$$M = \frac{E_1}{E_0}$$

若测出曝光胶片的密度变化, 按已知的胶片 H-D 曲线, 从密度变化可以推出一个近似的余弦型曝光量分布, 如图 1-8 所示。一般, 有效曝光量分布的调制度 $M_{\text{有效}}$ 小于真实的曝光量分布的调制度 $M_{\text{真}}$ 。因此定义胶片的调制度传递函数为

$$M(f) = \frac{M_{\text{有效}}(f)}{M_{\text{真}}(f)}$$

图 1-9 示出了一张胶片的调制传递函数对调制频率的关系曲线。不同的胶片产生明显响应的调制频率范围有很大不同, 它取决于卤化银晶粒粗细和乳胶的厚度等因素。胶片的频率范围大致在 50~2500 条线/mm。

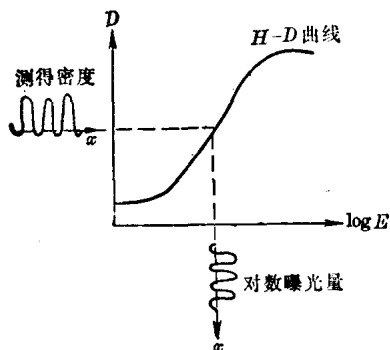


图 1-8 有效曝光量分布的测量

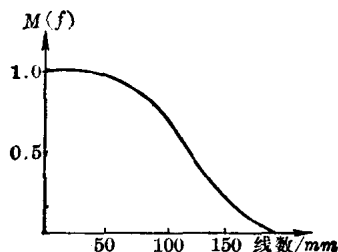


图 1-9 胶片调制传递函数

第二章 量化和采样

我们可以认为图像就是一些连续的函数。一幅图像中各点的灰度是位置的函数,这样的一幅图在用计算机处理之前必须把它先进行数字化。在图像中设定一个 $M \times N$ 点阵,对每一点定上灰度级。我们把整个灰度量程分成 K 个小段,图中任一点上的灰度“落入”这些小段中的某一个小段中,则就取这个小段的值,这就是“量化”。为了要从这些“量化”数字上重建一个“好”的图像,我们选取 M , N (对图采样)和 K (量化)的数值越大越好。通常,采样和量化愈好,则重建的图像就越好。但是,采样和量化超出了接受器的空间范围和灰度分辨本领,则 M , N 和 K 再大也没有用了。

第一节 采 样

采样的目的是用有限的一半或点阵的数目(所谓采样点)来代表一个连续的图片。采样的数目要以能够重建起图像为限度。重建像中可能要有微小的误差,但这些容许误差必须在不致影响接受器的灰度的空间分辨本领。

先从一维函数讨论采样技术。设有一维函数 $f(t)$, 其采样点为 $f(kT)$, 这里 k 取自 $-\infty$ 到 $+\infty$ 中的整数值,而 T 是采样周期。当我们要检验是否能从这些采样点来重建这个函数时,我们在采样点之间进行插值,以便重建起原来的 $f(t)$ 。这可用插值函数 $g(t)$ 来实现,即

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(kT)g(t-kT)$$

上式说明,在 t 时刻时,重建的函数等于用因子 $g(t-kT)$ 对采样点 $f(kT)$ 加权,而这个因子就是沿着 t -轴经过位移时间 kT 的插值函数 $g(t)$ 。现在假定 f 和 g 都能够进行傅里叶变换。今有

$$f(kT)g(t-kT) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t-\tau)\delta(t-kT)d\tau$$

将上述两式整理得到:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t-\tau) \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\tau-kT) \right\} d\tau$$

式中中括号内的函数以周期 T 重复,因而可用下述傅里叶级数表示:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\tau-kT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{+j \frac{2\pi n \tau}{T}}$$

式中傅里叶展开的系数 a_n 是

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\tau-kT) \right\} e^{-j \frac{2\pi n}{T} \tau} d\tau = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \delta(\tau) e^{-j \frac{2\pi n}{T} \tau} d\tau$$

由于只有总和中的 $k=0$ 项在积分范围内是非零值,而对全部 n 来说,