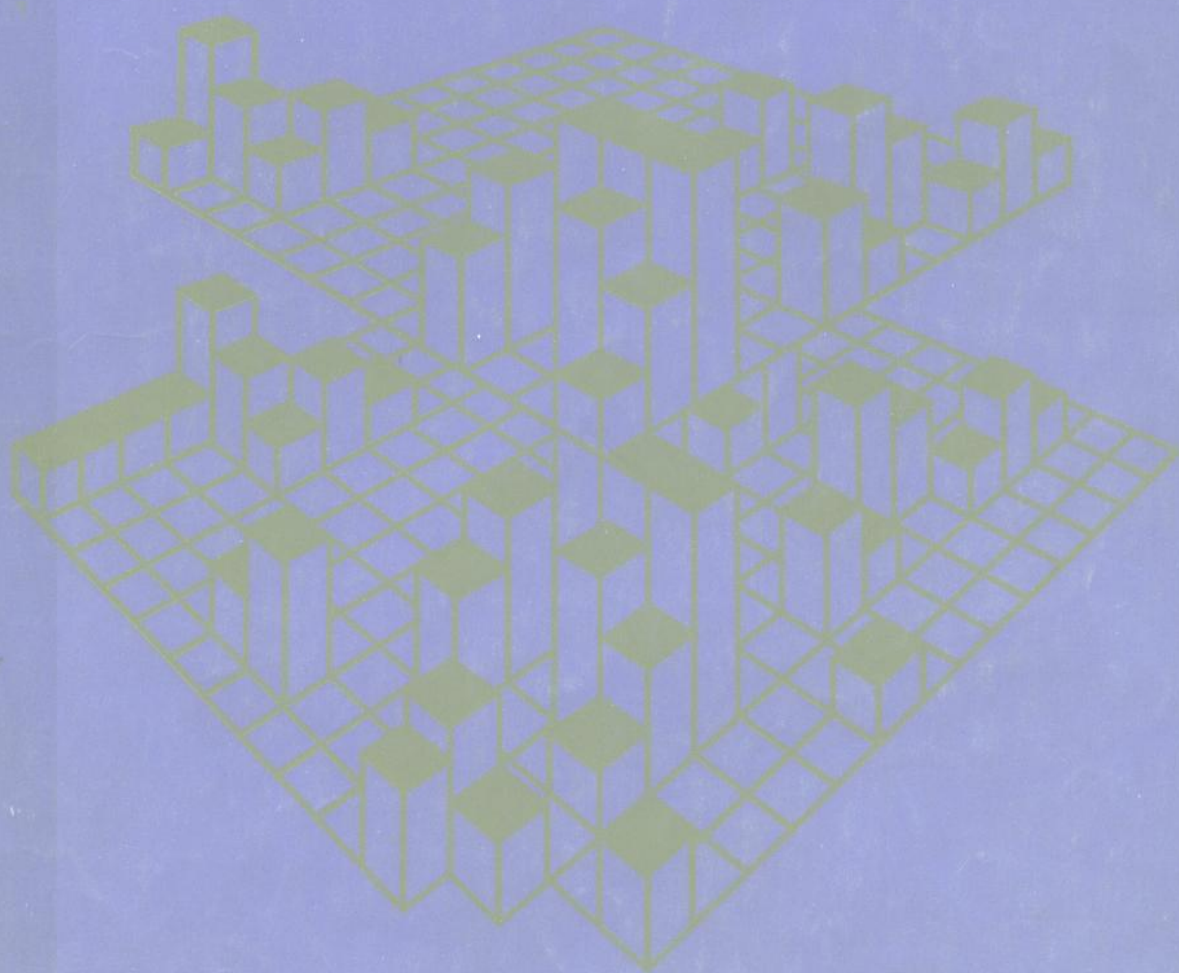


数字图象处理及其应用

孙仲康 沈振康 编著

SHUZITUXIANG CHULI
JI QI YINGYONG



73.72
29
2

数字图象处理及其应用

孙仲康
沈振康 编著



国防工业出版社

8610404

内 容 简 介

本书共分十章。第一、二章介绍了图象处理的一些理论和技术基础；第三、四、五章讨论了图象的增强、复原和分析；第六章介绍了图象数字传输中的编码和数据压缩问题；第七章介绍了立体成象及立体图象的重建问题；第八、九章专门讨论了数字图象匹配以及在实现中的一些实际问题；第十章介绍了数字图象处理系统及其硬、软件等。

本书可供科学研究、工业、医疗等部门以及大学中从事电子技术、数字计算技术、信息处理、图象传输与处理、遥感技术、放射性医疗技术以及图象匹配定位、匹配制导等方面的科学技术工作者、工程技术人员、教师、研究生、大学高年级学生阅读。

0006/03

数字图象处理及其应用

孙仲康 编著
沈振康

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 22¹/₂ 插页 2 520千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷 印数：10,001—5,000册

统一书号：15034·2865 定价：4.75元

前 言

由于数字计算技术及相应的信号处理技术的飞速发展,近十年来数字图象处理技术发展得非常迅速,并在科学研究、工业生产、资源的遥感探测、医疗卫生、空间探索和军事等各个领域内应用得越来越广泛;例如,工业中的无损检验,电子显微镜图象分辨率的改善,从资源卫星遥感图片中探测农业、矿业资源,航空照相的成图、地形分类自动化,遥感图片的数字传送、X射线体内断层立体成象以及空对地导弹、反坦克导弹、巡航导弹、航天飞行器的精确制导等均采用了数字图象处理技术。

数字图象的处理及其应用涉及到物理、生理、电子技术、计算机科学及数学等领域,它是在数字信号处理、线性系统、矢量代数、概率论、随机过程、检测与估计、傅里叶光学等理论和技术基础上发展起来的,因此读者可以在这些预备知识的基础上阅读本书。为了方便读者,书中附加了一个附录,对讨论中可能遇到的有关矩阵及线性代数方面的内容作了简介。

本书中的第八、九章由沈振康副教授编写,第七章§4由王绍霖副教授提供资料,其余的由孙仲康编写。朱益忠同志审阅了第一至五章,许织新同志审阅了第六章,王绍霖同志审阅了第七章,陈辉煌同志审阅了第十章的一部分。作者对在出版本书过程中参与撰写、编辑、审阅、讨论、插图照相绘制的所有同志们表示感谢。

由于作者在数字图象处理及其应用领域内的理论水平和实践经验还不适应这个领域的发展形势,因此难免会有不足、不妥或差错之处,希望读者多加批评指正。

编著者

1983年12月

目 录

第一章 连续和离散图象	1
§ 1 图象的形成基础和感觉	1
§ 1-1 光的辐射和度量	1
§ 1-2 人的视觉系统	2
§ 1-3 视觉现象	3
§ 2 连续图象	6
§ 2-1 连续图象的表述	6
§ 2-2 二维系统	7
§ 2-3 奇异算子	8
§ 2-4 可加性线性算子	9
§ 2-5 微分算子	11
§ 2-6 二维傅里叶变换	11
§ 2-7 可加性线性系统的傅里叶分析	13
§ 2-8 连续图象的统计特性	14
§ 2-9 随机图象的系统响应	17
§ 3 数字图象	18
§ 3-1 对确定场的采样与重建	18
§ 3-2 对随机场的采样与重建	21
§ 3-3 采样脉冲宽度的影响	23
§ 3-4 频域叠混效应	25
§ 3-5 离散图象的矩阵矢量表达	26
§ 3-6 离散图象的统计特性	32
§ 3-7 图象的分层量化	35
第二章 图象的线性变换	39
§ 1 线性算子	39
§ 1-1 广义线性算子	39
§ 1-2 线性算子的统计表达	42
§ 1-3 伪逆算子	43
§ 2 叠加算子	49
§ 2-1 有限区域叠加算子	49
§ 2-2 循环区域叠加算子	55
§ 2-3 选择算子	58
§ 3 二维变换	61
§ 3-1 酉变换算子	61
§ 3-2 傅里叶变换	64
§ 3-3 哈达玛 (Hadamard) 变换	70
§ 3-4 霍特林 (Hotelling) 变换	73
§ 3-5 奇异值分解 (SVD) 变换	75
§ 3-6 图象变换的统计分析及概率密度模型	76
第三章 图象的增强	80
§ 1 对比度增强	80
§ 2 直方图改善的图象增强	81
§ 2-1 原理	81
§ 2-2 直方图的均衡化	82

§ 2-3 离散图象直方图的均衡化	83
§ 2-4 直接规定增强图象的直方图	85
§ 3 传感器匹配变换	88
§ 4 图象的平滑	91
§ 4-1 邻区平均	91
§ 4-2 空间域低通滤波	92
§ 4-3 频率域低通滤波	92
§ 4-4 中值滤波法	94
§ 5 图象的锐化	95
§ 5-1 微分方法	95
§ 5-2 差分方法	96
§ 5-3 高通滤波	99
§ 5-4 统计区分法	101
§ 6 变换处理	102
§ 7 伪彩色增强处理	102
§ 7-1 光的彩色	102
§ 7-2 灰度-彩色变换	103
§ 7-3 频域伪彩色处理	104
§ 8 三维成象	105
§ 8-1 透视变换模型	105
§ 8-2 广义坐标系	107
§ 8-3 透视变换举例	110
§ 9 几何校正	113
§ 9-1 多项式扭曲校正法	113
§ 9-2 透视投影变换	115
第四章 图象的复原	121
§ 1 图象的退化	121
§ 2 图象复原的模型	121
§ 2-1 一般的图象复原模型	121
§ 2-2 离散复原模型	122
§ 3 连续图象空间滤波的复原	125
§ 3-1 逆滤波	125
§ 3-2 维纳滤波	127
§ 3-3 参数估值滤波器	128
§ 4 离散图象的代数复原法	128
§ 4-1 伪逆法	128
§ 4-2 奇异值分解伪逆法	129
§ 4-3 约束条件下的复原	131
§ 5 离散图象的统计复原法	133
§ 5-1 线性回归法	133
§ 5-2 维纳估计法	134
§ 5-3 非线性统计估计法	137
§ 6 均匀线性运动模糊的消除	139
§ 7 退化模型未知时的复原方法	142
§ 7-1 直接测量法	143
§ 7-2 间接估计法	143
§ 8 利用循环矩阵的特性作复原运算	144
§ 8-1 循环卷积的 DFT 求解	145
§ 8-2 循环卷积 DFT 解法作复原应用	148

第五章 图象的分析	150
§ 1 图象的特征	150
§ 1-1 幅度特征	150
§ 1-2 直方图特征	150
§ 1-3 变换系数特征	152
§ 1-4 点、线特征	153
§ 1-5 边缘特征	154
§ 2 图象的分割	159
§ 2-1 按幅度分割	159
§ 2-2 最佳门限值	161
§ 3 图象的符号描述	162
§ 3-1 连通性	163
§ 3-2 缩点、压窄、扩宽	164
§ 3-3 线条描述	165
§ 3-4 形状描述	167
§ 3-5 区域生长	172
§ 3-6 形状分割	173
§ 4 区域间的关系描述	173
§ 4-1 关系描述	173
§ 4-2 投影图的关系描述	177
§ 4-3 多个物体的关系描述	177
§ 5 图象的检测与配准	183
§ 5-1 模板匹配	183
§ 5-2 距离度量	185
§ 5-3 确定性连续图象的匹配滤波	185
§ 5-4 随机图象场的匹配滤波	188
§ 5-5 离散图象的匹配滤波	189
§ 5-6 相关配准	191
第六章 图象的编码及数据压缩	197
§ 1 引言	197
§ 2 有关信息的一些概念	197
§ 2-1 信息量	197
§ 2-2 熵	199
§ 3 编码	201
§ 3-1 熵与码	201
§ 3-2 霍夫曼 (Huffman) 码	202
§ 3-3 游程编码	203
§ 3-4 游程编码的分析	204
§ 4 预测及内插编码	206
§ 4-1 预测编码的原理	206
§ 4-2 差分脉码调制 (DPCM)	207
§ 4-3 内插编码	208
§ 5 变换域编码	208
§ 5-1 区域取样	209
§ 5-2 频谱外推	210
§ 5-3 门限取样	212
第七章 三维图象的处理	213
§ 1 立体摄象	213
§ 2 由投影图重建三维图象	215
§ 3 傅里叶变换重建	216

§ 3-1 N 维连续傅里叶变换	217
§ 3-2 投影	218
§ 3-3 投影——切片定理	219
§ 3-4 极坐标上有限切片实现近似重建	220
§ 4 卷积法重建	222
§ 5 代数法最优重建	226
§ 5-1 图象及投影的几何关系	226
§ 5-2 投影集 D 的计算方法	227
§ 5-3 优化重建	228
§ 5-4 有噪声条件下的优化重建	229
§ 5-5 重建实验举例	230
§ 6 重建技术的应用	231
第八章 数字图象匹配	233
§ 1 引言	233
§ 2 地图匹配问题的数学描述	234
§ 3 相似度量	237
§ 3-1 最小距离度量	237
§ 3-2 相关度量	239
§ 4 度量值的统计特性	243
§ 4-1 所研究的相关算法	243
§ 4-2 基本假设	244
§ 4-3 prod度量值的均值和方差	245
§ 4-4 MAD度量值的均值和方差	248
§ 4-5 放宽相邻象元独立的假设	252
§ 4-6 度量值的概率密度	253
§ 5 正确截获概率 P_c 的解析表示式	254
§ 5-1 prod和MAD算法的 P_c 解析式	255
§ 5-2 正确截获概率 P_c 的一般形式	257
§ 5-3 正确截获概率 P_c 的近似式 ⁽⁴⁸⁾	259
§ 6 相关算法的统计判决门限	262
§ 7 独立象元数 N 和信噪比SNR的估值器	267
§ 7-1 独立象元数 N 的估值器	267
§ 7-2 信噪比SNR的估值器	269
§ 8 匹配定位系统的精度分析	271
§ 8-1 二维相关系统的定位精度	272
§ 8-2 一维相关系统的二维精度	274
§ 9 各种误差因素对匹配性能的影响	280
§ 9-1 几何失真的影响	280
§ 9-2 图象灰度等级及其偏置量变化的影响	282
§ 9-3 量化误差的影响	283
§ 9-4 人工干扰的影响	283
第九章 图象匹配的一些实际问题	284
§ 1 引言	284
§ 2 地图匹配的预处理	284
§ 2-1 去均值的预处理	285
§ 2-2 数据压缩的预处理	285
§ 2-3 预处理中的滤波算法	286
§ 2-4 几何校正预处理	286
§ 3 快速匹配算法	294
§ 3-1 幅度排序相关算法	294

§ 3-2 FFT相关算法	296
§ 3-3 序贯相似度检测算法	297
§ 3-4 分层搜索的序贯判决算法	302
§ 4 受几何失真等影响小的匹配算法	304
§ 4-1 不变矩匹配算法	304
§ 4-2 相位相关算法	305
§ 4-3 多子区相关算法	307
第十章 数字图象处理系统	310
§ 1 图象数字化输入装置	310
§ 2 图象处理系统的输出装置	315
§ 3 图象处理软件系统	319
§ 4 图象处理系统举例	326
附录 矩阵与线性代数简介	328
参考文献	349

第一章 连续和离散图象

§ 1 图象的形成基础和感觉

数字图象处理所涉及的都是以不同方式形成的实际图象。这些图象的形成和对这些图象的感觉,对图象处理问题的提出有关键性的作用。人所感受的图象大都是通过光的反射、传输而作用到人的视觉系统中来的。因此,讨论图象的形成基础和感觉就涉及到光的辐射、光强的计量、人的视觉系统等因素。当然待处理的图象并不都是可见光形成的图象,如合成孔径雷达图、X光图、红外辐射图、超声图、地震图、地形轮廓图等,当它们被转换成光图象时仍然可以利用同样的有关图象处理的原理。

§ 1-1 光的辐射和度量

光是一种能引起人眼视网膜产生视觉感受的辐射能量,它占据电磁频谱中一段窄的区域即 350 毫微米(紫色)到 780 毫微米(红色)。与所有形式的能量一样,辐射的能量 Q 也可以定量地测量出来,其单位是焦耳或其它方便表达的单位名称。下面列出描述辐射能量随空间及时间而变化的几个定义:

辐射密度 ω 它是单位体积 V 内包含的辐射能量,即

$$\omega = \frac{dQ}{dV} \quad (1-1-1)$$

辐射功率 p 它是单位时间 t 内辐射的能量,其单位是瓦特,即

$$p = \frac{dQ}{dt} \quad (1-1-2)$$

辐射发射率 M 它定义为单位面积 A_r 发射的辐射功率,即

$$M = \frac{dp}{dA_r} \quad (1-1-3)$$

辐照度 E 它定义为进入接收器单位面积 A_r 的辐射功率,即

$$E = \frac{dp}{dA_r} \quad (1-1-4)$$

辐射强度 I 它定义为单位立体角 Ω 内辐射源辐射的功率,其单位是(瓦特/单位立体角),即

$$I = \frac{dp}{d\Omega} \quad (1-1-5)$$

单位立体角 Ω 用立体弧度作单位来表达,一个立体弧度是半径为 1 米的球面上 1 平方米面积所对应的立体角。

辐射率 L 它定义为辐射源单位投影面积 A_p 辐射到接收器单位立体角内的功率,即

$$L = \frac{dI}{dA_p} \quad (1-1-6)$$

辐射谱分解 辐射能量或功率都是辐射波长的函数, 即 $Q(\lambda)$ 或 $p(\lambda)$, 这叫做辐射能量或功率的谱分解。给定功率谱 $p(\lambda)$, 则总的辐射功率 P 可以由下式确定

$$P = \int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda \quad (1-1-7)$$

辐射谱的反射率 $\rho(\lambda)$ 、传输率 $\tau(\lambda)$ 、吸收率 $\alpha(\lambda)$ 当辐射功率 P_I 入射到一个物体上, 某些功率 P_R 由表面反射出来, 某些功率 P_T 由物体传输出去, 还有某些功率 P_A 被物体吸收。这时入射功率 P_I 分成三部分, 即

$$P_I = P_R + P_T + P_A \quad (1-1-8)$$

而物体对进入的、不同波长的辐射, 其反射率 $\rho(\lambda)$ 、传输率 $\tau(\lambda)$ 及吸收率 $\alpha(\lambda)$, 分别为

$$\rho(\lambda) = \frac{P_R(\lambda)}{P_I(\lambda)}, \quad \tau(\lambda) = \frac{P_T(\lambda)}{P_I(\lambda)}, \quad \alpha(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_I(\lambda)} \quad (1-1-9)$$

在使用如上定义的参数时, 需要把空间的因素考虑进去才更准确。

光是一种辐射能量, 但是从日常生活中可以知道光的辐射率与人们感觉到的亮度之间不是一种简单的关系。例如, 一束小的“暗光”在白天很难看出, 而在夜间看起来就足够亮了, 这就与人眼的视觉特性有关系。为此要探讨光度学, 对正常人的观察而言, 这是一种把感受到的亮度与辐射能量联系起来的学问。

照明强度的单位用烛光来定义, 一支烛光对应工作在白金凝固温度 (2045K) 时的黑体辐射在投影面积为六十分之一平方厘米上的照明强度 (也就是单位立体弧度上的流明数)。

在亮光条件下及暗光条件下, 正常人的观察对 不同波长感受到的 照明度 (单位是流明/瓦特) 的关系曲线示于图 1-1。这个图是国际标准的照明度函数。由这种照明度函数定义的观察者是国际标准观察者。对不同的观察者或者对同一个观察者在不同观察条件时的照明度函数都将会有所差别。利用这种照明度函数可以把照明强度与辐射强度联系起来。这种函数也反映出正常的观察者对辐射频谱的响应关系。

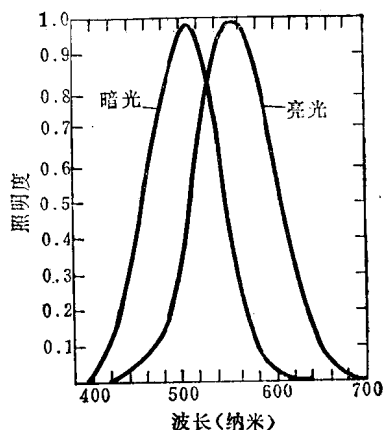


图1-1 归一化照明度函数

§ 1-2 人的视觉系统

据有关资料得知, 人的视觉现象 99.9% 是由物理和生理因素引起的, 只有 0.1% 是由心理因素引起的。简单地描述一下人的视觉系统的解剖图是有用的。人的视觉系统, 如图 1-2 所示可以分成四个部分: 人的眼睛 (眼球)、视神经传导途径、侧外膝状体及视觉皮层。景物在左、右眼视网膜接收器上形成景象, 这些视网膜接收器通过光化反应把光能转换成电脉冲, 这些脉冲通过视神经传到视径交叉, 再传到侧外膝状体, 最后到达大脑中的视觉皮层。

再来看一下图 1-3 的人眼的简化截面图。眼球最外面一层不透明的叫角膜, 它的形

状接近一个球状外壳，半径约 11 毫米，厚度 1 毫米，在眼的前部，巩膜埋入到透明的角膜中去。角膜厚度约 1 毫米，并以 8 毫米为半径向前凸出。眼球背部视神经在主轴鼻侧一边渗入巩膜。在角膜与巩膜连接点贴近的后面有睫状体。在睫状体贴近的前部是虹膜，虹膜是接近圆形的孔径，它构成眼睛的瞳孔。由于照明及心理的影响，肌肉的膨胀和收缩控制虹膜使瞳孔的开度大小可以在 2 到 8 毫米内改变。

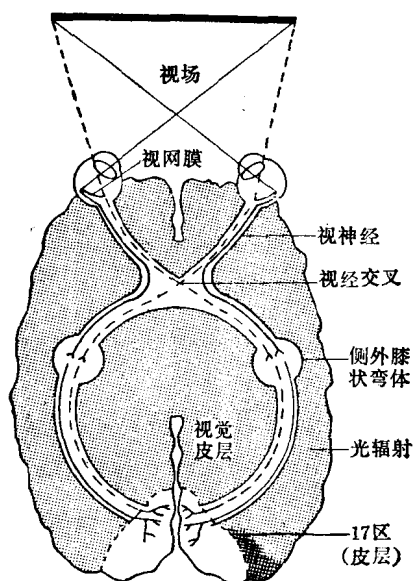


图1-2 人的视觉系统结构

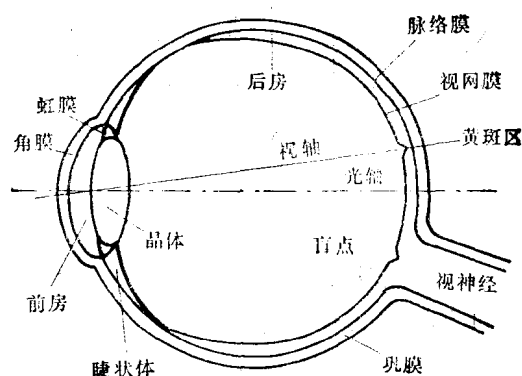


图1-3 人眼的简化截面图

在瞳孔的贴背后有一个双凸晶体，它的形状可以改变，从而可以调节晶体构成的透镜的有效焦距以适应观察不同距离上的景物。晶体前有充满水样液的前房，晶体后为充满玻璃状粘液的后房。眼球的最内层覆盖着感光的视网膜，它由光的接收器及视神经所构成。

视网膜表面包含了不均匀分布的感光细胞，即杆状体及锥状体。在眼球后中心部的视网膜呈内陷状的是黄斑区，在这个区内只有锥状体感光细胞，这个区对景象及其色彩的识别能力最强。在黄斑区内视神经与锥状体是一对一地连接起来的，随着离黄斑区的距离越远，一根视神经连接的感光细胞数越来越多，在视网膜边缘上达到 1 比 140 的程度。杆状体对弱照明很灵敏，它承担了暗光条件下的视觉功能，而锥状体则对强照明很敏感，它承担了亮光条件下的视觉功能。

眼球的瞳孔在强光照明下能收缩，从而减少落到视网膜上的光量。随着时间的推移，视网膜能适应新的感光水平，这时瞳孔恢复到原来的尺寸大小。瞳孔能控制进入的光量约 30 倍左右，视网膜能适应的光强度范围约有 10^{10} 倍。

视网膜上的感光细胞与视神经联系起来，通过视神经交叉把视神经作交叉集合后又再度分开，并通过外侧膝状体达到后脑的视觉皮层——视中枢。

§ 1-3 视觉现象

在描述视觉系统、图象信息及摄象装置的特性时，往往用到一些与视觉现象有关的

名词术语和参量, 下面来说明一下这些概念。

亮度

这是一个与光刺激量有联系的一个心理学概念。由于眼睛对光刺激有很好的适应能力, 因此人不能准确地判定绝对亮度。光源的照明强度与它发射的光量及发射的立体张角有关。两个相同强度的光源并不一定呈现出具有相同的亮度。

对比度

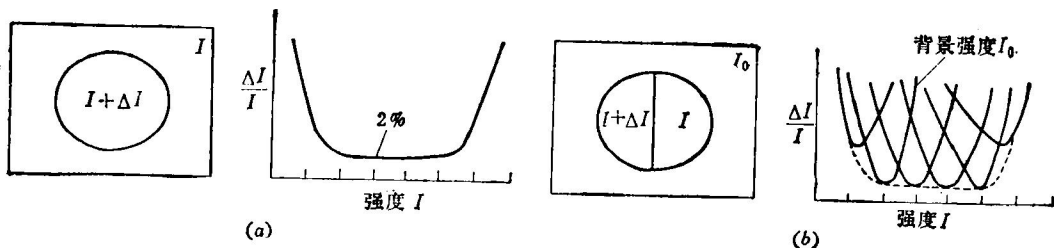


图1-4 对比度

(a) 无背景; (b) 有背景。

眼睛对照明强度变化的响应是非线性的。假如在背景强度 I 中有一个强度为 $I + \Delta I$ 的光斑点, 则刚好能从背景中看出来这个斑点所需的强度增量 ΔI 是 I 的一个函数, 见图 1-4(a)。由图可见在 I 相当大的范围内, 比值 $\frac{\Delta I}{I}$ 的值保持一个约为 0.02 的恒值, 这个比值被称之为韦伯 (Weber) 比值。在 I 值高区及低区, 比值迅速增大。假如背景强度为 I_0 , 则具有不同强度 (I , $I + \Delta I$) 的光点斑的两半部分要能区别开来, 其所需的增量 ΔI 由图 1-4(b) 所示。这时在不同背景强度 I_0 条件下的韦伯比值随 I 而变化的关系曲线中, 比值保持恒值的范围缩小了。各条曲线的下限包络与图 1-4(a) 中的曲线相当。虽然这个比值的恒值区缩小了, 但对于大多数电子摄像系统来说它们的动态范围与在固定背景 I_0 条件下 $\frac{\Delta I}{I}$ 比值恒值区的大小还是差不多的。可以列出下列关系式

$$d(\log I) = \frac{dI}{I} \quad (1-1-10)$$

这意味着韦伯比值对应于强度对数的微分, 也即强度对数的增量对应于韦伯比值, 它能与对比度直接联系起来。为此很多图象处理系统中往往对图象点的强度对数值而并不对其强度值进行处理操作。

同时对比

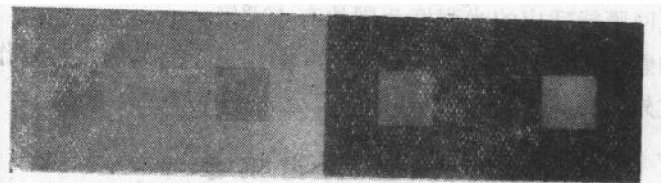


图1-5 同时对比

视在的亮度与局部背景强度关系很大，图 1-5 中各个小方块的强度都是一样的，但是由于它们周围局部的背景强度不一样，看起来这些小方块的强度好象是不一样的。这就是视觉的“同时对比”现象。

马赫带

若有一组不同灰度值条带的照片如图 1-6(a) 所示，每个条带内所反射的光强度是相等的，相邻条带间的反射强度相差一个常值。然而看起来每个条带的右边要比左边来得亮，这就叫做马赫带效应。对应图 1-6(d) 的马赫带图案的照片示于图中(c)。在照片中的 B 处有一条亮带，在 D 处有一条暗带，纯粹从强度分布来解释这个现象是说不通的。这种亮度过冲的马赫带效应是由于眼睛的空间频率响应性质而引起的。由于眼睛不可能对空间高频率的亮度变化完美地作出反应，因此图象处理系统对边缘轮廓保真度的要求有时可以降低一些。

分辨率

分辨率是与视觉系统有联系的最复杂的参量之一。它可以利用调制传递函数(M、T、F)、光线对、电视行数或光点尺寸来加以定义。光线对是一条白线与一条黑线构成的线对。一毫米长度中的线对数可以用来描述空间频率。当线对的宽度越来越窄，直到人眼区分不开黑白线时，这时就可以用一毫米内的线对数来定义分辨率。在电视中的行数并不等于光线对数，电视中黑线与白线各算成一行，再加上显象管光点亮度的空间分布呈高斯状，因此行的宽度要用亮度为峰值的一半的地方来确定；例如电视行数 1000 大约等于 416 对光线对。利用电视行数也可以表达分辨率。还有用调制传递函数(M、T、F)来定义分辨率的，这是一种心理学的度量。若观察一个光的传输率按空间频率正弦变化的测试图案，则可得不同空间频率条件下的视觉响应如图 1-7 所示。若规定一个输出幅度的下限值，可以定出响应超过下限值的频域范围，因此可以据此来定义分辨率。这种调制传递函数不仅可以作分辨率的度量，还可反映出视觉系统对任意输入图案的系统响应。由图 1-7 可见视觉系统的调制传递函数呈现为一种带通滤波器的特性，在空间频率的低端及高端处传递函数值全都降落下来了。这就说明了为什么会出现马赫带效应的现象。

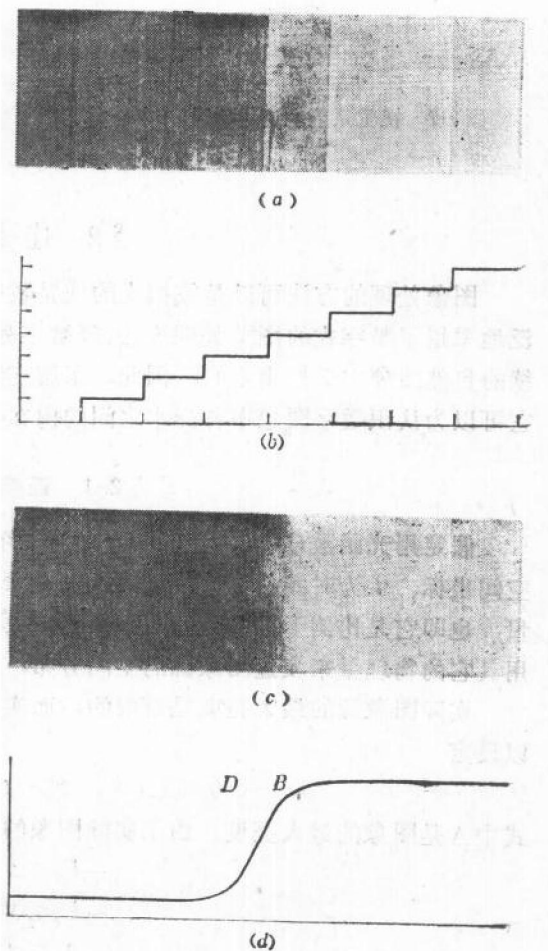


图1-6 马赫带效应举例

(a) 强度阶跃照相；(b) 阶跃强度分布；
(c) 强度斜升照相；(d) 斜升强度分布。

分辨率反映了人眼对视场中细节的区别能力。边缘的锐度与分辨率是有关系的, 但应该把这两者区别开来。图 1-8 示出分辨率是非锐边缘的宽度、边缘锐度是边缘形状的函数, 而对比度则是强度差 $I(b) - I(a)$ 的函数。

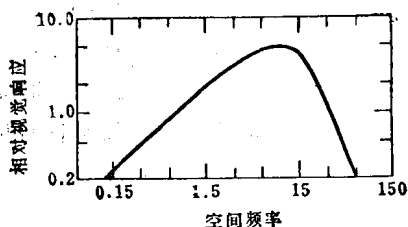


图1-7 视觉系统响应灵敏度

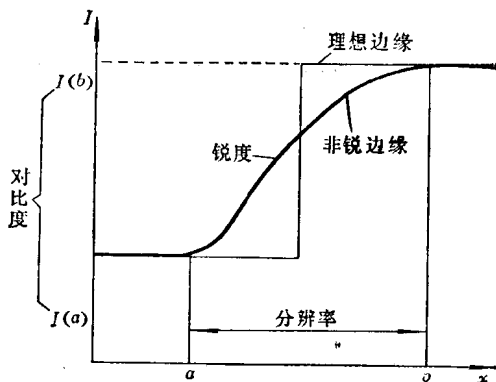


图1-8 对比度、锐度、分辨率的关系

§ 2 连续图象

图象处理的方法可以是模拟式的或是数字式的。由于数字计算技术的迅猛发展, 广泛地采用了数字式的图象处理方法。经数字处理的图象都是离散图象, 它们大多数是由连续的自然图象中采样出来的; 因此, 了解连续图象的空间域和时间域的特性是必要的, 它可以为认识数字图象中各样本之间的内在关系提供基础。

§ 2-1 连续图象的表述

假定用光函数 $C(x, y, t, \lambda)$ 表示图象源的空间能量分布, 其中 (x, y) 为空间坐标、 t 为时间、 λ 为波长。这里考虑的是能量分布, 例如光强度是一种正、实的量, 也即它是比例于场强幅值的平方的, 故图象的光函数是实的、非负的。当然也可以用其它的物理量来表达图象源的空间分布, 这里采用的是能量的空间分布。

实际图象源的最大亮度是有限的, 而实际摄像系统总有少量的背景光存在, 所以可以设定

$$0 \leq C(x, y, t, \lambda) \leq A \quad (1-2-1)$$

式中 A 是图象的最大亮度。由于实际图象的大小是有限的、摄象时间也是有限的, 故得

$$\left. \begin{aligned} -L_x &\leq x \leq L_x \\ -L_y &\leq y \leq L_y \\ -T &\leq t \leq T \end{aligned} \right\} \quad (1-2-2)$$

所以图象源的光函数 $C(x, y, t, \lambda)$ 是一个有界的四维函数, 其独立变量是有界的; 当然还要设定这个图象函数在定义域内是连续的。

在一个多光谱的摄像系统中, 观察到的图象场的模型可以用图象光函数的频谱加权积分来表达; 即对第 i 个光谱图象场, 可以给出下式:

$$F_i(x, y, t) = \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) S_i(\lambda) d\lambda \quad (1-2-3)$$

式中, $S_i(\lambda)$ 是第 i 个传感器的频率响应。

为了简化符号, 选择一个图象函数 $F(x, y, t)$ 来表示一个实际摄象系统摄取的一个图象场。对于单色的摄象系统, 图象函数 $F(x, y, t)$ 规定为表示图象的亮度或者是亮度的某种变换后的物理表达。这种图象函数也可用来表达一般的三维场, 例如一个图象扫描器的时变噪声。

参考一维时间信号的标准定义, 图象函数在给定坐标 (x, y) 点上的时间平均值可以定义如下

$$\langle F(x, y, t) \rangle_T = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{2T} \int_{-T}^T F(x, y, t) L(t) dt \right\} \quad (1-2-4)$$

式中, $L(t)$ 是时间加权函数。类似地在给定时间 t 上, 图象的平均亮度可用空间平均值来给出, 即

$$\langle F(x, y, t) \rangle_s = \lim_{\substack{L_x \rightarrow \infty \\ L_y \rightarrow \infty}} \left\{ \frac{1}{4L_x L_y} \int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} F(x, y, t) dx dy \right\} \quad (1-2-5)$$

若图象是不随时间而变的, 这时图象函数 F 中的变量 t 可以去掉。当然在电影中图象函数在时间上是采样的, 而在电视中可以把图象的空间变化通过图象扫描过程变换成时间上的变化。下面的讨论主要涉及去掉了变量 t 的图象函数。

§ 2-2 二维系统

一般地说, 一个二维系统的作用是把输入的二维函数的某个集 $F_1(x, y)$ 、 $F_2(x, y)$ 、 $\dots$ 、 $F_N(x, y)$ 映射成输出的二维函数的某个集 $G_1(x, y)$ 、 $G_2(x, y)$ 、 $\dots$ 、 $G_M(x, y)$ 。这里函数中连续独立的空间变量为 x, y , $(-\infty < x, y < \infty)$ 。这个映射过程可以用算子

$$\mathcal{O}_m\{\cdot\} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1-2-6)$$

来表达, 它可以把输入函数集与输出函数集用下列一组方程联系起来, 即

$$\begin{aligned} G_1(x, y) &= \mathcal{O}_1\{F_1(x, y), F_2(x, y), \dots, F_N(x, y)\} \\ &\vdots \\ G_m(x, y) &= \mathcal{O}_m\{F_1(x, y), F_2(x, y), \dots, F_N(x, y)\} \\ &\vdots \\ G_M(x, y) &= \mathcal{O}_M\{F_1(x, y), F_2(x, y), \dots, F_N(x, y)\} \end{aligned} \quad (1-2-7)$$

映射可以是一对一的, 也可以是多个对多个的。一对一的映射可定义为

$$G(x, y) = \mathcal{O}\{F(x, y)\} \quad (1-2-8)$$

在一维系统中独立变量是时间, 系统的输出是过去的和现在的输入的函数, 而不是未来输入的函数, 这种系统叫因果系统。但二维系统一般是非因果性的系统, 因为空间变量 (x, y) 对应某参考轴可以是负的。为了进一步讨论二维系统的性质, 首先需要了解某些特定的算子。

§ 2-3 奇异算子

在分析二维系统时,特别是对连续函数实施采样的系统,奇异算子得到了广泛的应用。二维狄拉克 δ 函数是一种奇异算子,它具有如下性质:

$$\delta(x, y) = \begin{cases} \infty & x = 0, y = 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$\delta(x - \xi, y - \eta) = \begin{cases} \infty & x = \xi, y = \eta \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-2-9)$$

$$\iint_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \delta(x, y) dx dy = 1 \quad \text{对 } \varepsilon > 0$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} F(\xi, \eta) \delta(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = F(x, y)$$

最后一个性质称之为 δ 函数的筛选性质。

二维 δ 函数可以分解成定义在正交坐标轴上的两个一维 δ 函数的乘积,即

$$\delta(x, y) = \delta(x) \delta(y) \quad (1-2-10)$$

δ 函数可以定义成一族函数的极限,举例示出如下

矩形函数极限

$$\delta(x, y) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} [\alpha^2 \text{rect}(\alpha x) \text{rect}(\alpha y)] \quad (1-2-11)$$

圆函数极限

$$\delta(x, y) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \left[\frac{\alpha^2}{\pi} \text{circ}(\alpha \sqrt{x^2 + y^2}) \right] \quad (1-2-12)$$

高斯函数极限

$$\delta(x, y) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} [\alpha^2 \exp\{-\alpha^2 \pi(x^2 + y^2)\}] \quad (1-2-13)$$

sinc函数极限

$$\delta(x, y) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} [\alpha^2 \text{sinc}(\alpha x) \text{sinc}(\alpha y)] \quad (1-2-14)$$

贝塞尔函数极限

$$\delta(x, y) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \left[\frac{\alpha J_1(2\pi\alpha\sqrt{x^2 + y^2})}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \quad (1-2-15)$$

式中

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |x| > \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$\text{circ}(r) = \begin{cases} 1, & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}$$