



第二章：图像数字化

中国科学技术大学
电子工程与信息科学系

主讲教师：李厚强 (lihq@ustc.edu.cn)
周文罡 (zhwg@ustc.edu.cn)
李 礼 (lil1@ustc.edu.cn)
胡 洋 (eeyhu@ustc.edu.cn)



图像数字化

- 数字图像基础
 - 成像过程
 - 数字化



图像数字化

□ 数字图像基础

■ 成像过程

- ✓ 视觉过程
- ✓ 成像变换
- ✓ 成像亮度
- ✓ 视觉系统

■ 数字化

视觉过程

□ 光学过程

- 视网膜成像为倒影
- 晶状体可以改变形状，调节聚焦焦距（范围：14~17mm），远离变扁，靠近加厚
- 中央凹：视网膜中视觉（辨色力、分辨力）最敏锐的区域

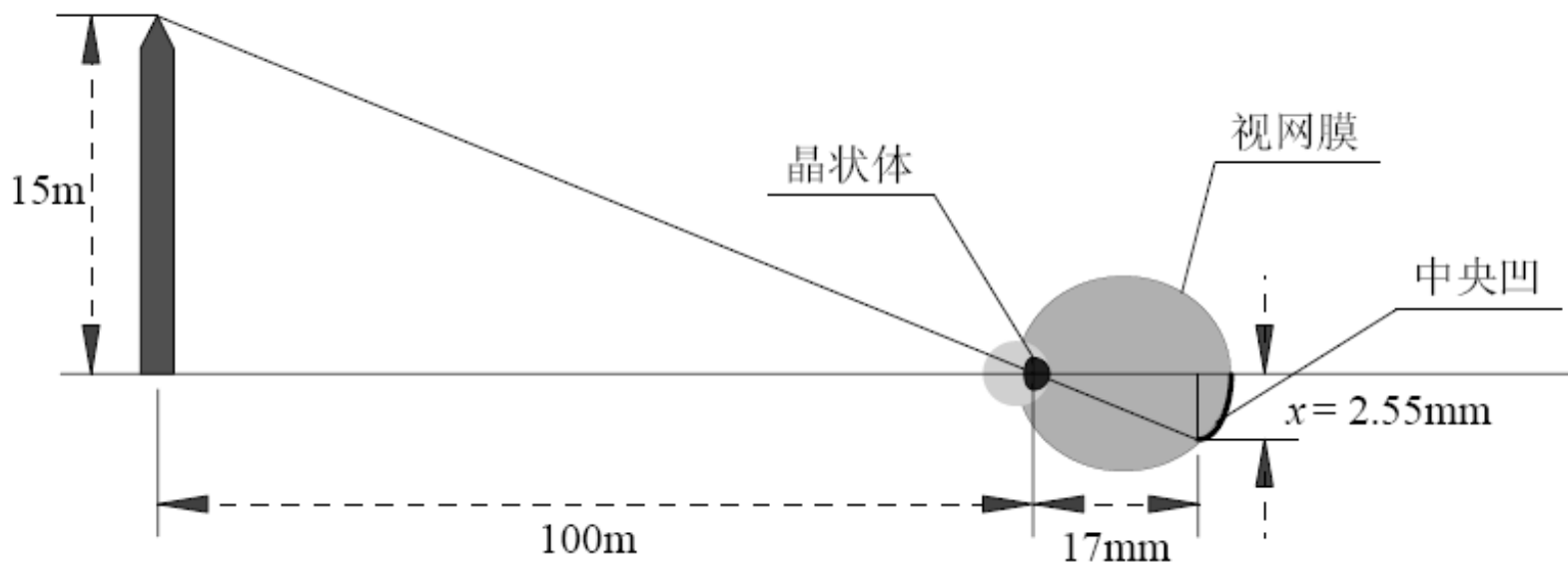


图 2.1.1 人眼水平横截面示意图

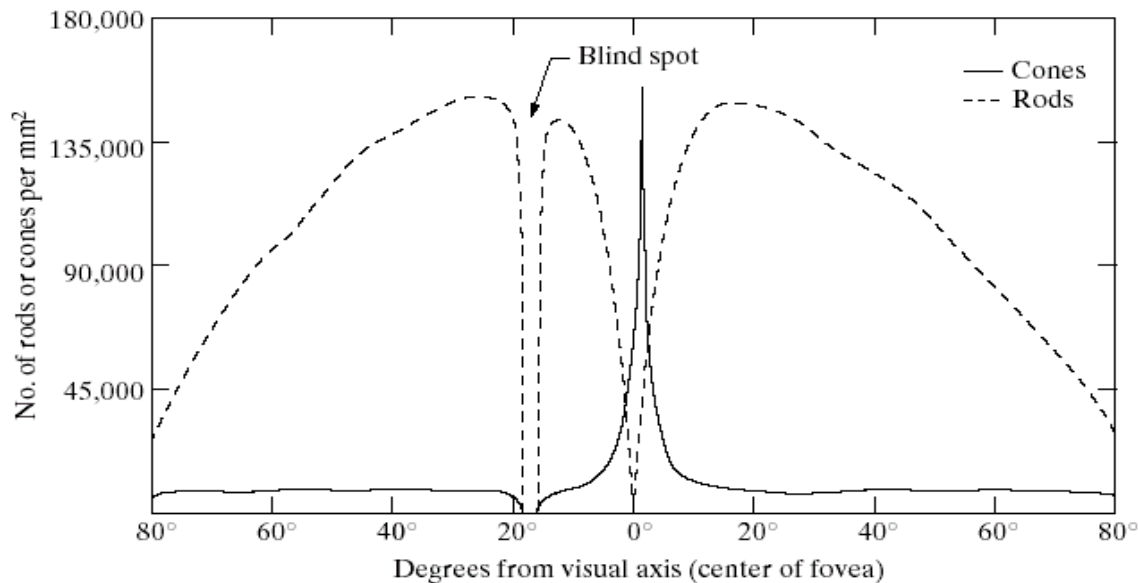
$$15 / 100 = 2.55 / 17$$



视觉过程

□ 化学过程

- 视网膜上布满两类光感受器：锥细胞和柱细胞
 - ✓ 锥细胞(cone)：数量少（600~700万），对颜色高度敏感
 - ✓ 锥细胞视觉：明视觉或亮光视觉(photopic vision)
 - ✓ 柱细胞(rod)：数量多（7500~15000万），分辨率比较低不感受颜色，对低照度较敏感
 - ✓ 柱细胞视觉：暗视觉或微光视觉(scotopic vision)





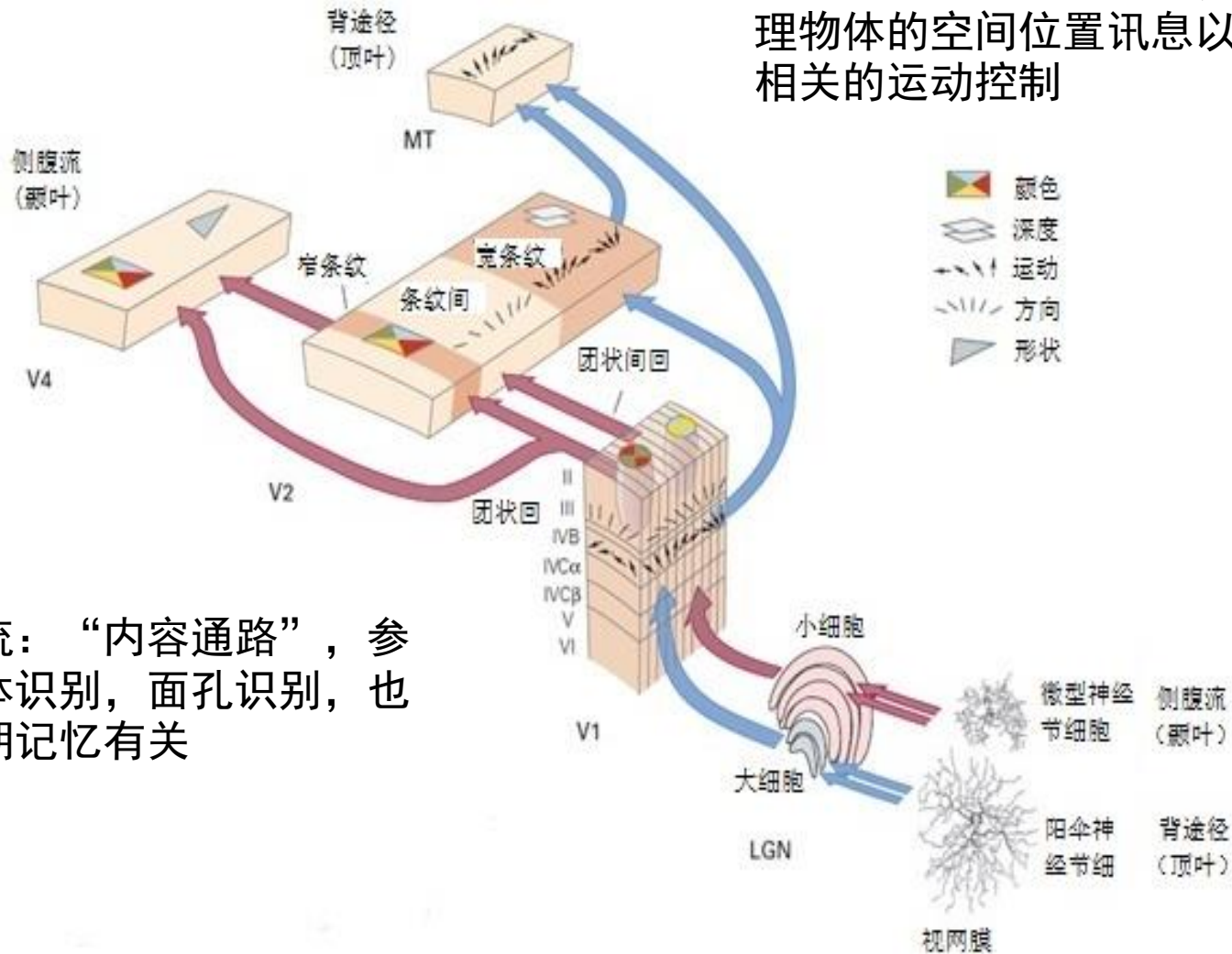
视觉过程

□ 神经处理过程

- 每个视网膜接收单元都与一个神经元细胞借助**突触**(synapse)相连
- 每个神经元细胞借助其它的**突触**与其它细胞连接，从而构成光神经(optical nerve)网络
- 光神经进一步与大脑中的侧区域(side region of the brain)连接，并到达大脑中的纹状皮层(striate cortex, V1)和纹外皮层(extrastriate cortex, V2, V3, V4, V5)
- 对光刺激产生的响应经过一系列处理最终形成关于场景的表像，从而将对光的感受转化为对景物的知觉

视觉过程：脑视觉信息处理通路

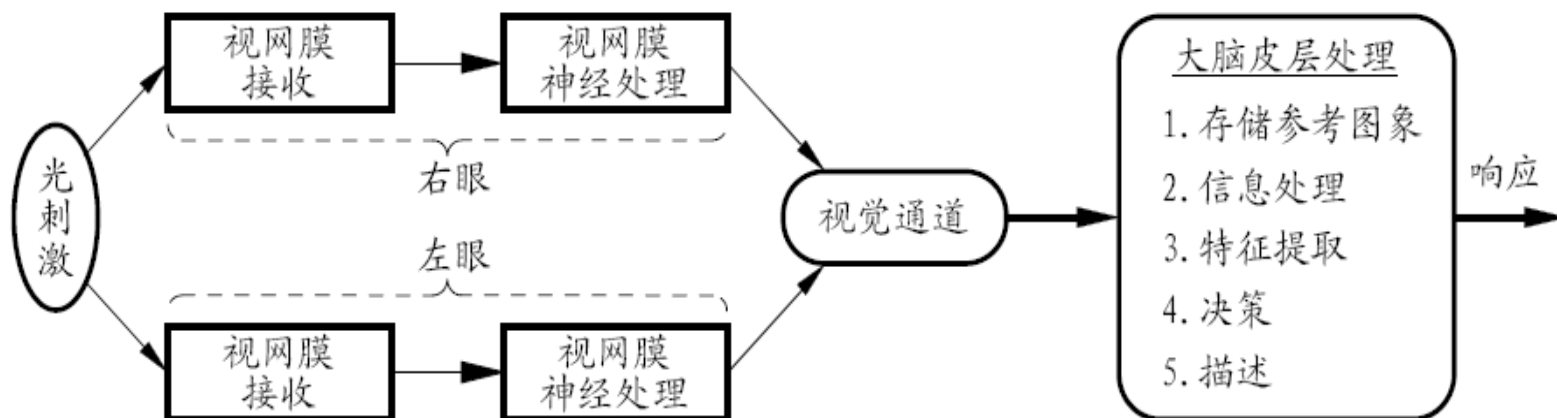
背途径：“空间通路”，处理物体的空间位置讯息以及相关的运动控制



腹侧流：“内容通路”，参与物体识别，面孔识别，也与长期记忆有关

视觉过程

□ 整体视觉过程



视觉 = “视” + “觉”



成像变换

□ 投影成像

- 将3-D客观场景投影到2-D图像平面

□ 成像过程

- 两个坐标系统
 - ✓ 世界坐标系 XYZ
 - ✓ 图像平面 xy

从 XYZ 到 xy

成像变换

□ 成像过程

■ 三维坐标系

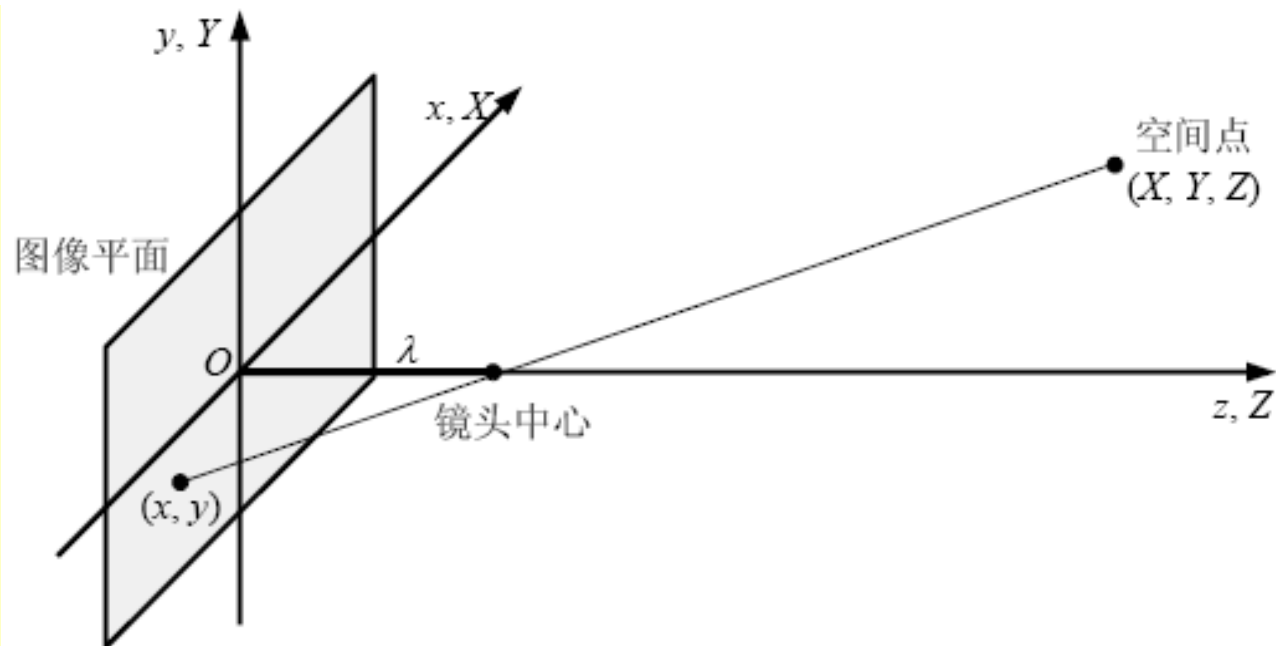


图 2.2.1 投影变换成像示意图

3-D点投影后的
图像平面坐标

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z}$$

$$y = \frac{\lambda Y}{\lambda - Z}$$

非线性投影等式
(分母含变量Z)



成像变换

□ 齐次坐标

- 可用来将前述非线性（分母中含变量 Z ）等式表示成线性矩阵形式

- ✓ 笛卡尔坐标: $\mathbf{w} = [X \quad Y \quad Z]^T$

- ✓ 齐次坐标: $\mathbf{w}_h = [kX \quad kY \quad kZ \quad k]^T$ (k 为任意非零常数)

齐次坐标 \Rightarrow 笛卡尔坐标: 用第4个坐标量去除前3个坐标量

- 可以表示两条平行线在无穷远处相交
- 可以使用矩阵乘法运算表示仿射变换



成像变换

□ 齐次坐标透视变换

$$\mathbf{c}_h = \mathbf{P}\mathbf{w}_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\lambda & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ -kZ/\lambda + k \end{bmatrix}$$

齐次形式的
摄像机坐标

用第4项分别去除前3个项

$$\mathbf{c} = [x \quad y \quad z]^T = \left[\frac{\lambda X}{\lambda - Z} \quad \frac{\lambda Y}{\lambda - Z} \quad \frac{\lambda Z}{\lambda - Z} \right]^T$$



成像变换

□ 逆投影变换

- 根据2-D图像坐标来确定3-D客观景物的坐标

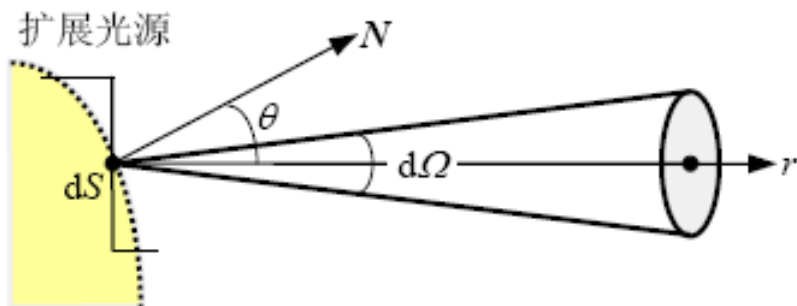
$$w_h = P^{-1} c_h \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda & 1 \end{bmatrix}$$

- 从3D客观场景映射到图像平面的投影变换是一个一到多的变换
- 每一个2D图像平面上的坐标点对应过空间点 (X, Y, Z) 的一条直线

成像亮度

□ 景物所受到的光照度

- 光度学：研究光辐射强弱的学科
- 光通量：表示光辐射的功率或光辐射量
 - ✓ 单位：lm（流明）
- 发光强度：指定方向上，单位立体角内发出的光通量
 - ✓ 单位：cd（坎[德拉]）
 - ✓ $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$
- 亮度：指定方向上，单位投影面积的发光强度



$$B \equiv \frac{dI}{dS'} \equiv \frac{dI}{dS \cos \theta} \equiv \frac{d\Phi}{d\Omega dS \cos \theta}$$

图 2.2.2 扩展光源



成像亮度

□ 图像成像模型

■ 2-D亮度函数： $f(x, y)$

- ✓ 亮度是能量的量度，一定不为零且为有限值

$$0 < f(x, y) < \infty$$

- 入射到可见场景上的光量
- 场景中目标对入射光反射的比率
- 与照度成分 $i(x, y)$ 和反射成分 $r(x, y)$ 相关



成像亮度

□ 景物表面对光的反射程度

- 景物的亮度既与入射光照度有关也与景物表面对光反射的性质有关

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$$

$$0 < f(x, y) < \infty$$

$$0 < i(x, y) < \infty$$

$$0 < r(x, y) < 1$$

黑天鹅绒：0.01；

不锈钢：0.65；

白墙平面：0.80；

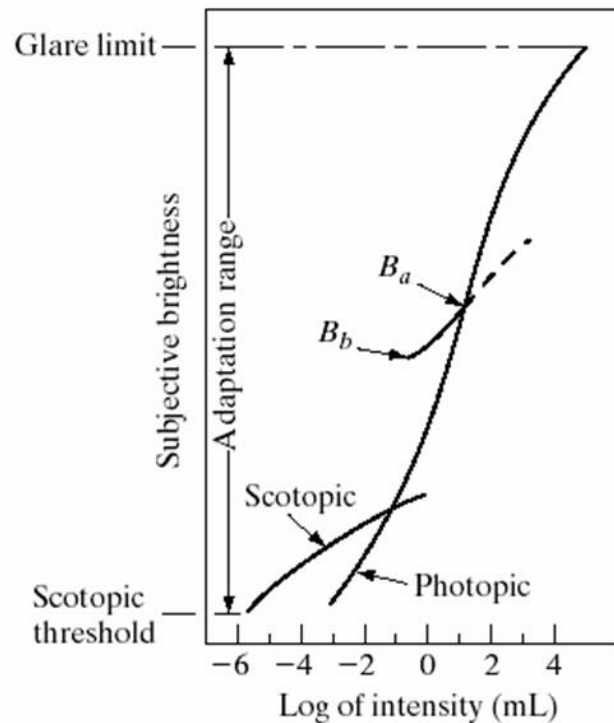
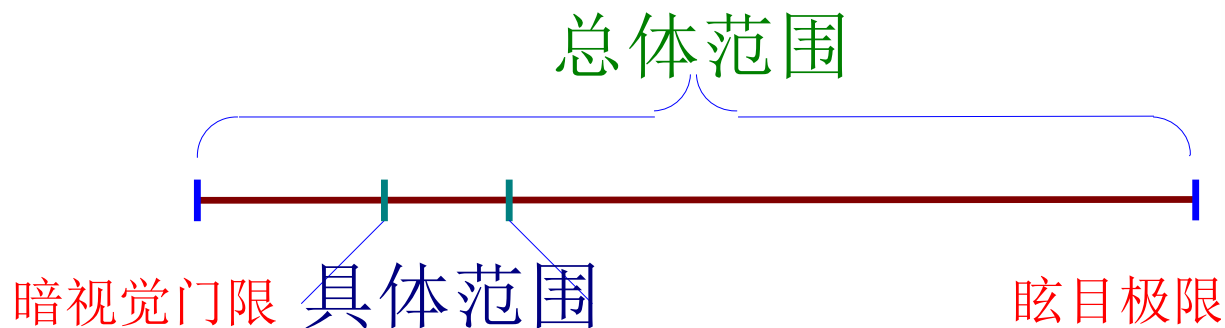
镀银器皿：0.90；

白雪：0.93

视觉系统对光的感知特点

□ 人眼适应的亮度范围

- 总体范围大：从暗视觉门限到眩目极限之间的范围在 10^{10} 量级
- 具体范围小：一般范围在 10^2 量级



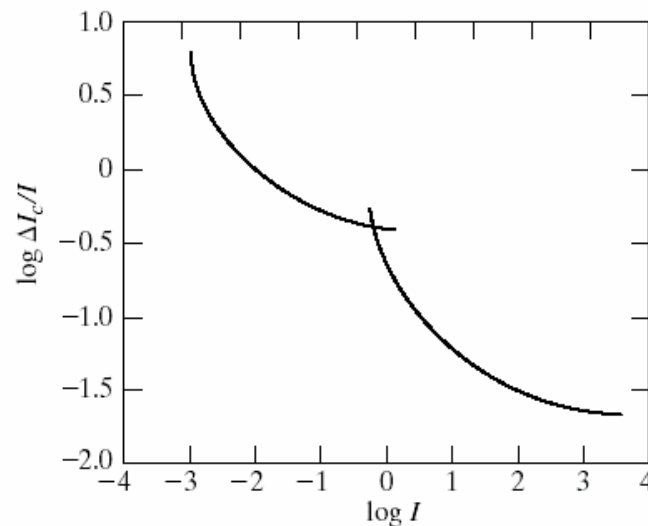
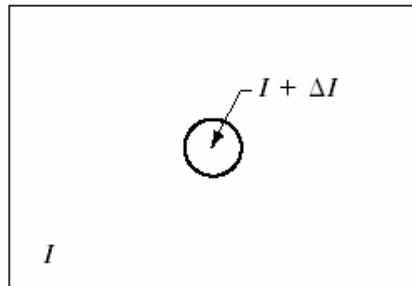
视觉系统对光的感知特点

□ 亮度变化的感知

- 人类视觉系统对**亮度变化**的感知比对亮度本身要敏感
- 人类视觉系统对光强度的响应不是线性的，而是**对数**形式的

□ 亮度适应和分辨

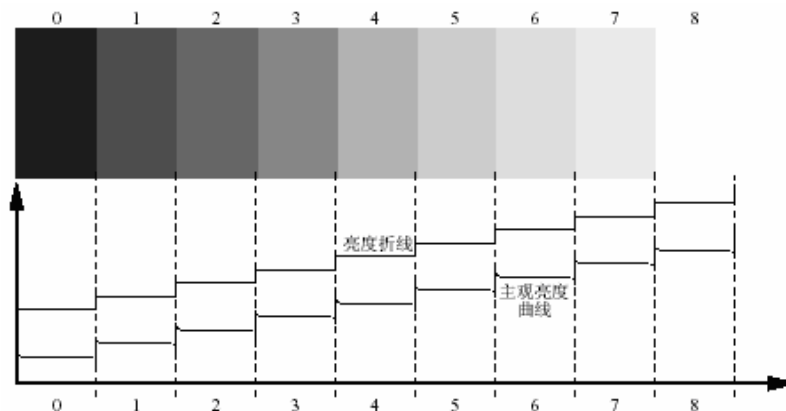
- 低照度级别，亮度分辨率较差；高照度级别，亮度分辨率较高



视觉系统对光的感知特点

□ 亮度错觉

- 马赫带：在亮度变化部分附近的亮区和暗区分别感知到一条更暗和更亮的条带



- 同时对比度

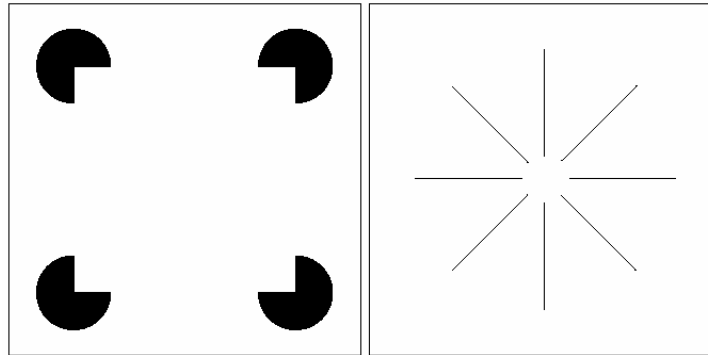


视觉系统对光的感知特点

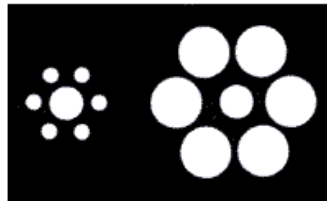
□ 视觉错觉

- 由视觉系统特性特性、心理、知识等方面有关，形成机制尚未完全了解

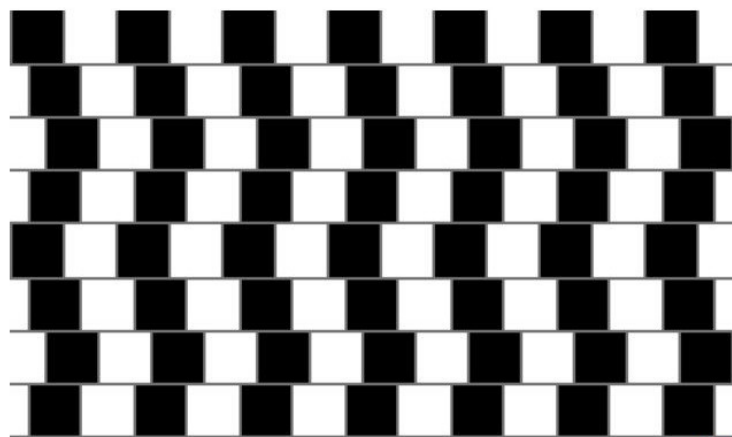
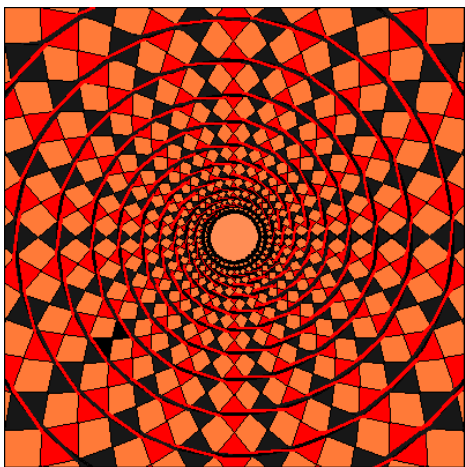
填充



几何特性



视觉系统对光的感知特点



Rubin Vase





图像数字化

□ 数字图像基础

■ 成像过程

■ 数字化

- ✓ 采样与量化
- ✓ 像素的邻域与距离
- ✓ 图像采集网格
- ✓ 距离变换



采样与量化

□ 图像 \Rightarrow 数字图像

$$f(x, y) \Rightarrow I(r, c)$$

- 空间坐标的离散化叫做空间采样

$$x, y \Rightarrow r, c$$

- 幅度的离散化叫做幅度量化

$$f \Rightarrow I$$



采样与量化

□ 数字图像

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0, M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \cdots & f(N-1, M-1) \end{bmatrix}$$

图像（水平）尺寸 M : $M = 2^m$

图像（垂直）尺寸 N : $N = 2^n$

像素灰度级数 G (k -bit): $G = 2^k$

图像所需的位数 b : $b = M \times N \times k$



采样与量化

□ 数字图像

$$b = M \times N \times k$$

存储1幅 32×32 , 16个灰度级的图需要 4 096 bit

存储1幅 128×128 , 64个灰度级的图需要 98 304 bit

存储1幅 512×512 , 256个灰度级的图需要 2 097 152 bit

□ 常见的分辨率 (P: Progressive, 代表逐行扫描)

- 720P: 1280×720 (HD, 高清)
- 1080P: 1920×1080 (full HD, 全高清)
- 2K: 2560×1440 , 2048×1536 , 2560×1600
- 4K: 4096×2160 , 4096×3112 , 3656×2664 , 3840×2160

采样与量化

□ 图像空间分辨率变化所产生的效果 (515x512~16x16)

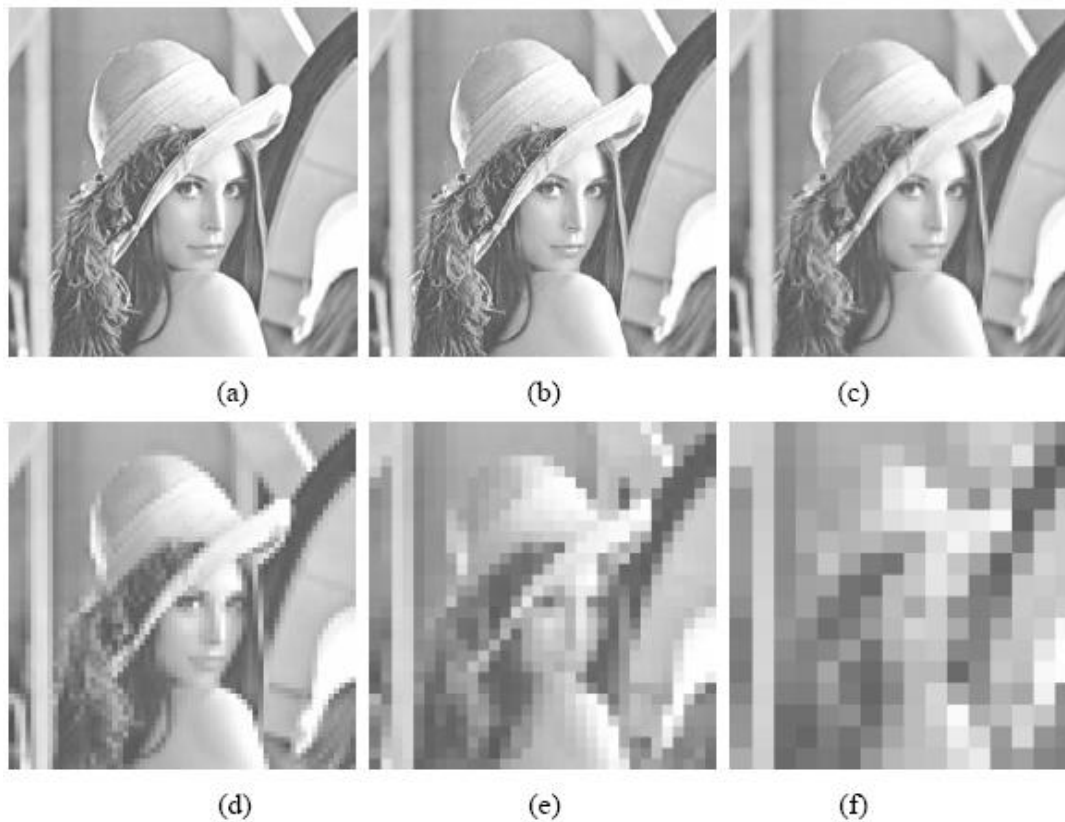


图 2.4.2 图像空间分辨率变化所产生的效果

采样与量化

□ 图像幅度分辨率变化所产生的效果 (256, 64, 16, 8, 4, 2)



图 2.4.3 图像幅度分辨率变化所产生的效果

采样与量化

□ 空间和幅度分辨率同时变化所产生的效果

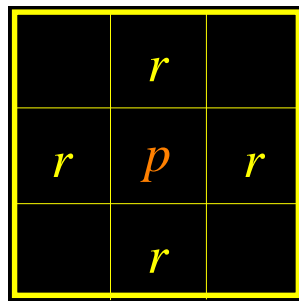


256x256,128;
181x181,64;
128x128,32;
90x90,16;
64x64,8;
45x45,4

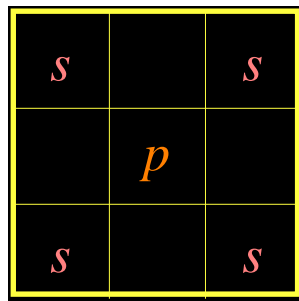
图 2.4.4 图像空间和幅度分辨率同时变化所产生的效果

像素的邻域

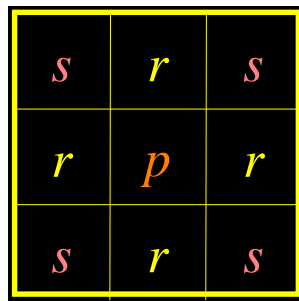
□ 4-邻域—— $N_4(p)$



□ 对角邻域—— $N_D(p)$



□ 8-邻域—— $N_8(p)$





像素间的邻接，连接和连通

□ 连接和连通

(adjacency, 邻接) vs. (connectivity, 连接)

邻接仅考虑像素间的空间关系

两个像素是否连接：

(1) 是否接触（邻接）

(2) 灰度值是否满足某个特定的相似准则（同在一个灰度值集合中取值）



像素间的邻接，连接和连通

□ 3种连接

■ 4-连接

✓ 2个像素 p 和 r 在 V 中取值且 r 在 $N_4(p)$ 中

■ 8-连接

✓ 2个像素 p 和 r 在 V 中取值且 r 在 $N_8(p)$ 中

0	1	0
0	1	0
0	0	1

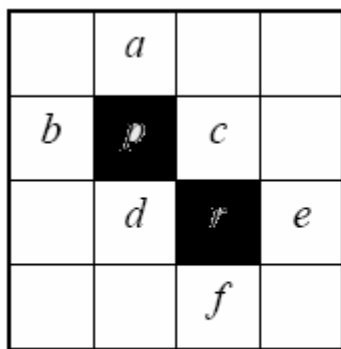
0	1	0
0	1	0
0	0	1



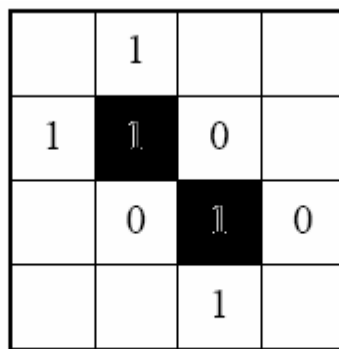
像素间的邻接，连接和连通

□ 3种连接

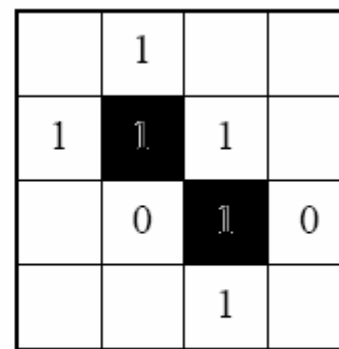
- m-连接（混合连接）：2个像素 p 和 r 在 V 中取值且满足下列条件之一
 - ✓ r 在 $N_4(p)$ 中
 - ✓ r 在 $N_D(p)$ 中且集合 $N_4(p) \cap N_4(r)$ 不包含 V 中取值的像素



(a)



(b)



(c)

像素间的邻接，连接和连通

- 混合连接的应用：消除8-连接可能产生的歧义性

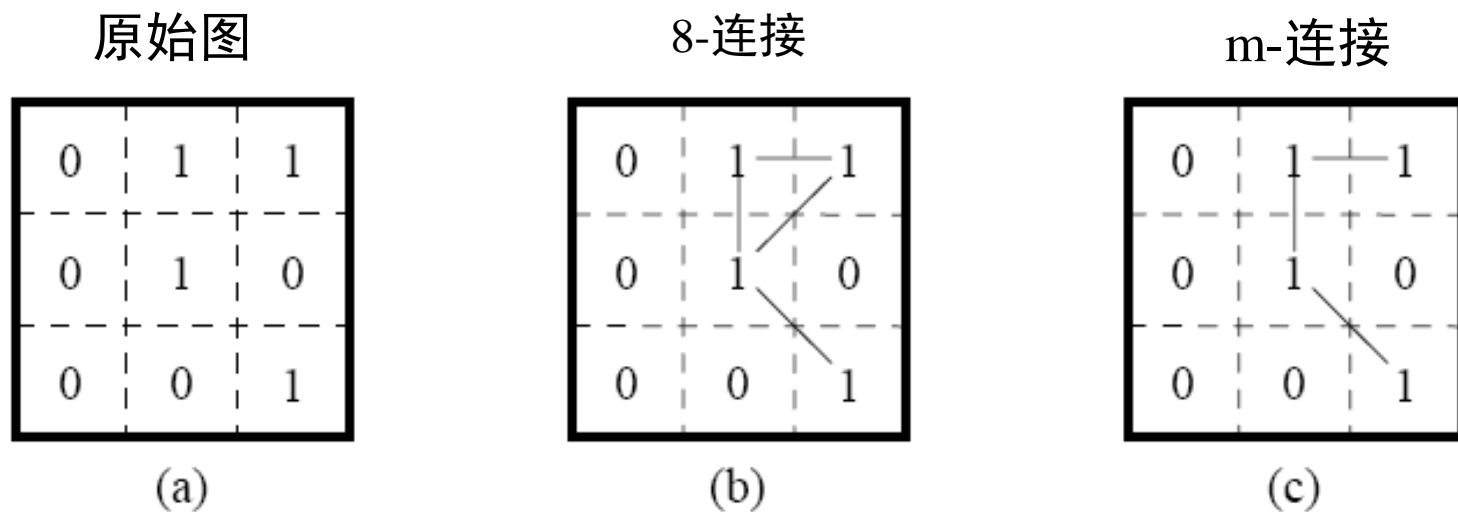


图 3.1.3 像素间的混合连接



像素间的邻接，连接和连通

□ 连通

- 连接是连通的一种特例，两个像素之间有通路则称为连通

□ 通路

- 由一系列依次连接的像素组成

从具有坐标 (x, y) 的像素 p 到具有坐标 (s, t) 的像素 q 的一条通路由一系列具有坐标 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , ..., (x_n, y_n) 的独立像素组成。

这里 $(x_0, y_0) = (x, y)$, $(x_n, y_n) = (s, t)$, 且 (x_i, y_i) 与 (x_{i-1}, y_{i-1}) 连接, 其中 $1 \leq i \leq n$, n 为通路长度

4-连通, 8-连通 \Rightarrow 4-通路, 8-通路



像素间的邻接，连接和连通

□ 像素集合的连接和连通

- 对2个图像子集 S 和 T 来说，如果 S 中的一个或一些像素与 T 中的一个或一些像素连接，则可以说2个图像子集 S 和 T 是连接的
- 完全在一个图像子集中的像素组成的通路上的像素集合构成该图像子集中的一个**连通组元**
- 如果 S 中只有1个连通组元，即 S 中所有像素都互相连通，则称 S 是一个**连通集**



像素间的距离

□ 距离度量

■ 距离度量函数的定义

✓ 给定3个像素 \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} , 坐标分别为 (x_1, x_2) , (y_1, y_2) , (z_1, z_2) , 如果下列条件满足, 则 D 是距离度量函数:

① 非负性: $D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq 0$ ($D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0$, 当且仅当 $\mathbf{x} = \mathbf{y}$)

② 对称性: $D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = D(\mathbf{y}, \mathbf{x})$

③ 三角不等式: $D(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + D(\mathbf{y}, \mathbf{z})$

■ L_p 范数 (norm) 及其诱导出的距离度量: 对于向量 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$

✓ L_p 范数: $\|\mathbf{u}\|_p = (\sum_{i=1}^k |u_i|^p)^{\frac{1}{p}}$

✓ L_p 范数诱导的距离度量: $D(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|_p = (\sum_{i=1}^k |u_i - v_i|^p)^{\frac{1}{p}}$



像素间的距离

□ 距离量度函数

■ 欧氏 (Euclidean) 距离

✓ 等价于 L_2 距离

$$D_e(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

■ 城区 (city-block) 距离

✓ 等价于 L_1 距离

$$D_4(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2|$$

■ 棋盘 (chessboard) 距离

✓ 等价于 L_∞ 距离

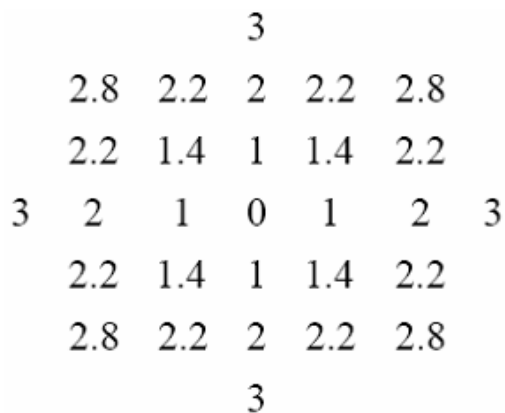
$$D_8(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max(|x_1 - y_1|, |x_2 - y_2|)$$



像素间的距离

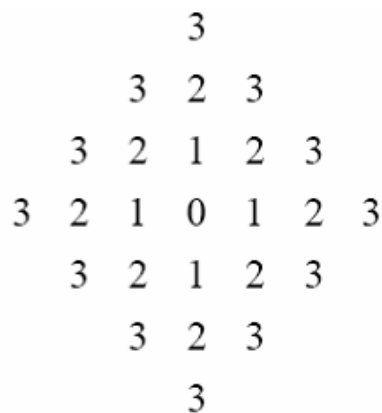
□ 距离量度函数

等距离轮廓图案



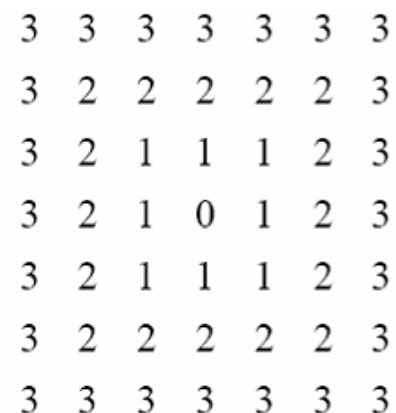
(a)

D_E



(b)

D_4



(c)

D_8



像素间的距离

□ 用距离定义邻域

- 考虑在空间点 (x_p, y_p) 的像素 p

- ✓ 4-邻域—— $N_4(p)$

$$N_4(p) = \{r \mid D_4(p, r) = 1\}$$

- ✓ 8-邻域—— $N_8(p)$

$$N_8(p) = \{r \mid D_8(p, r) = 1\}$$

图象采集网格

□ 三种不同的采样模式

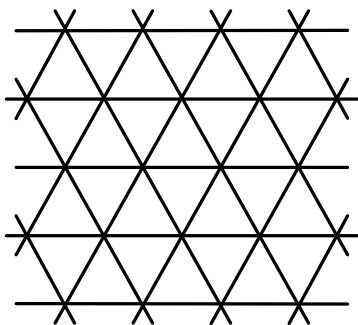
- 图象采集：用一个离散的模式采样

$$m \cdot \frac{(n-2)\pi}{n} = 2\pi$$

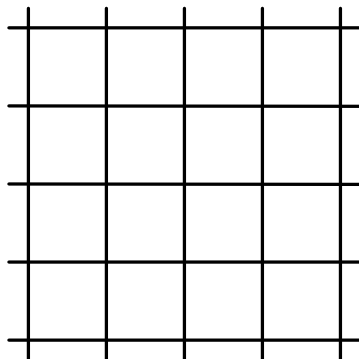
- 三种规则的形式：

- ✓ 采样时，采集在各多边形的中央点的数据

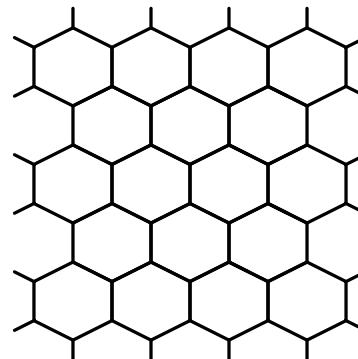
三角形



正方形



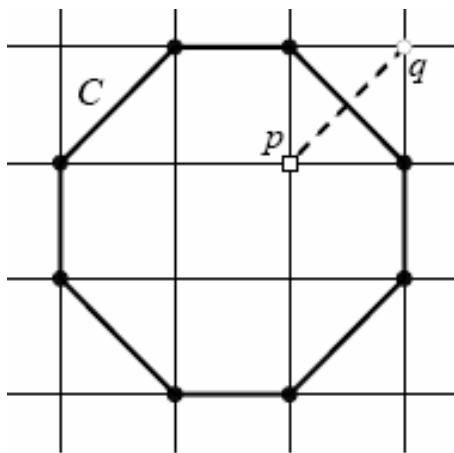
六边形



图象采集网格

□ 三种不同的图像网格

- 网格：将图象平面分解成小单元的集合
- 图象网格与采样模式互补
 - ✓ 正方形网格



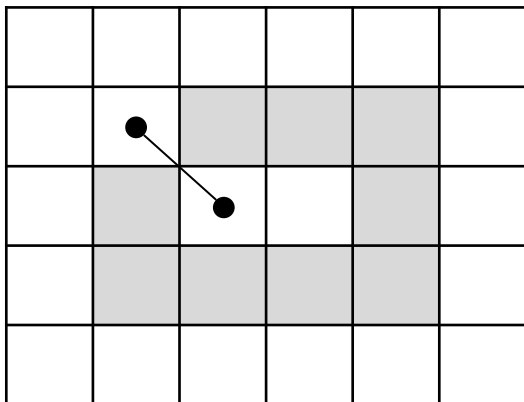
广泛使用：直观，无边界问题

连通悖论

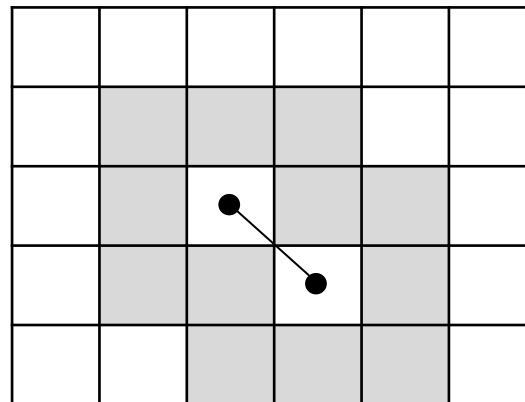
□ 连通悖论：

- 当区域的轮廓点和内部点均采用8-连通或4-连通时，存在问题：

区域轮廓点为8-连通，但所“封闭”
包围的内部区域仍然与外部连通



区域轮廓点为4-连通，无交叉，
但内部被隔为两个4-连通区域



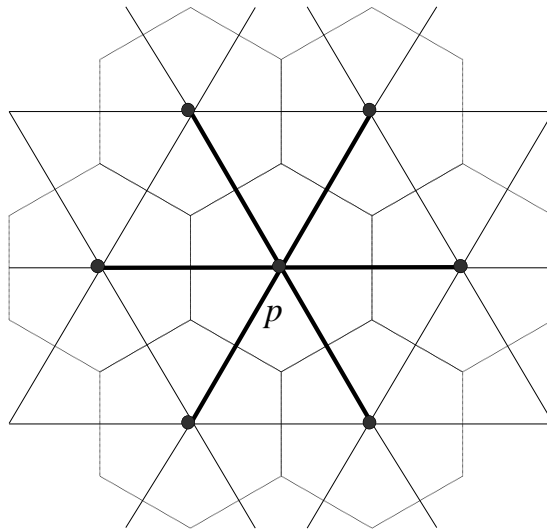
- 解决办法：区域的轮廓点和内/外部点要采用不同的连通性来定义
 - ✓ 内/外部点按8-方向连通定义，则轮廓按4-方向连通
 - ✓ 内/外部点按4-方向连通定义，则轮廓按8-方向连通

图象采集网格

□ 三种不同的图像网格

■ 图象网格与采样模式互补

✓ 三角形网格



相邻像素：有共同边
粗实线连接相邻像素
细线表示三角形网格
点线对应采样模式

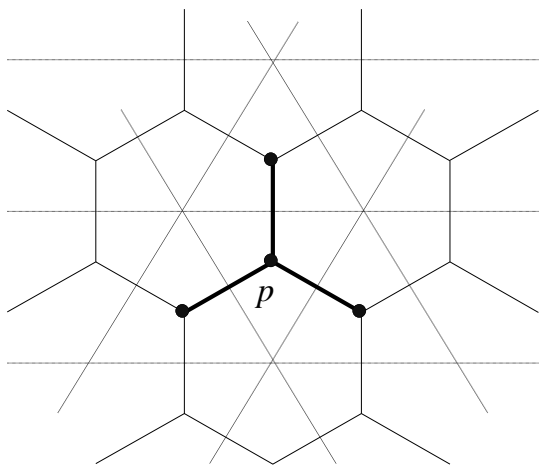
对像素 p ，它的6-邻域记为 $N_6(p)$

图象采集网格

□ 三种不同的采样模式

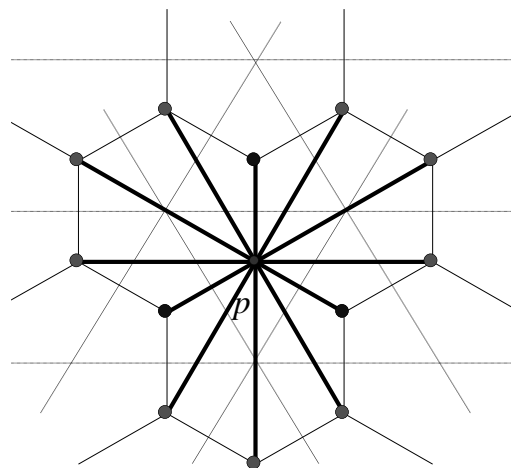
■ 图象网格与采样模式互补

✓ 六边形网格



$N_3(p)$: 有公共边

邻域过于稀疏



$N_{12}(p)$: 有公共顶点



图象采集网格

□ 三种图象采样效率比较

■ 采样效率定义为：单位圆面积与覆盖该单位圆的网格面积之比

✓ 三角形采样效率： $\pi / 3\sqrt{3} = (0.60)$

✓ 四边形采样效率： $\pi / 4 = (0.79)$

✓ 六边形采样效率： $\pi / 2\sqrt{3} = (0.91)$



距离变换

- 距离变换是一种特殊的变换，它把二值图像转化为灰度图像，其本身是一个全局概念，但可以借助对局部距离的计算而化整为零地进行
 - 定义和性质
 - 局部距离的计算
 - 离散距离变换的实现
 - 3-D距离变换

定义和性质

- 距离变换计算区域中的每个点与最接近的区域外的点之间距离，把二值图象变换为灰度图象
- 给定一个点集 P 、一个子集 B 以及满足测度条件的距离函数 $d(., .)$ ，对 P 的距离变换中赋予点 $p \in P$ 的值为：

$$DT(p) = \min_{q \in B} \{d(p, q)\}$$

- 距离图 (map) 可用矩阵 $[DT(p)]$ 来表示

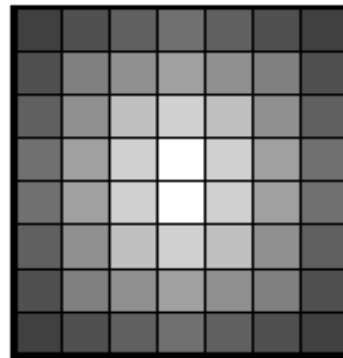


图 3.4.1 用灰度图表示的距离图



局部距离的计算

□ 全局的操作，所以计算量会很大

性质： 给定一个离散集合 P 和它的一个子集 B ，用 d 表示计算距离图的离散距离函数。那么，对任何点 $p \in P^\circ$ (即 $p \in P-B$)，存在 p 的一个邻域点 q (即 $q \in N(p)$)，使得在 p 的离散距离变换值 $DT(p)$ 满足 $DT(p) = DT(q) + d(p, q)$

进一步，因为 p 和 q 互为邻接点，从 p 移动到 q 的长度为 $l(p, q) = d(p, q)$ 。这样，对任意点 $p \notin B$ ，离散距离变换可由 $DT(p) = \min\{DT(q') + l(p, q'), q' \in N(p)\}$ 来刻画

局部距离的计算

□ 用于局部距离扩展的模板

- 模板基于4-邻域定义且被用来扩展 d_4 距离
- 模板基于8-邻域且被用来扩展 d_8 距离或 $d_{a,b}$ 距离 ($a = 1, b = 1$)
- 模板基于16-邻域且被用来扩展 $d_{a,b,c}$ 距离

∞	a	∞
a	0	a
∞	a	∞

(a)

b	a	b
a	0	a
b	a	b

(b)

∞	c	∞	c	∞
c	b	a	b	c
∞	a	0	a	∞
c	b	a	b	c
∞	c	∞	c	∞

(c)

图 3.4.2 用于计算距离变换的模板



局部距离的计算

□ 初始化距离图

$$DT^{(0)}(p) = \begin{cases} 0 & \text{当 } p \in B \\ \infty & \text{当 } p \notin B \end{cases}$$

□ 用下面规则将距离值从像素 $q = (x_p + k, y_p + l)$ 传播到 p

$$DT^{(t)}(p) = \min_{k,l} \{DT^{(t-1)}(q) + M(k, l); q = (x_p + k, y_p + l)\}$$

□ 更新过程持续进行到距离图不再变化而停止

离散距离变换的实现

□ 串行实现

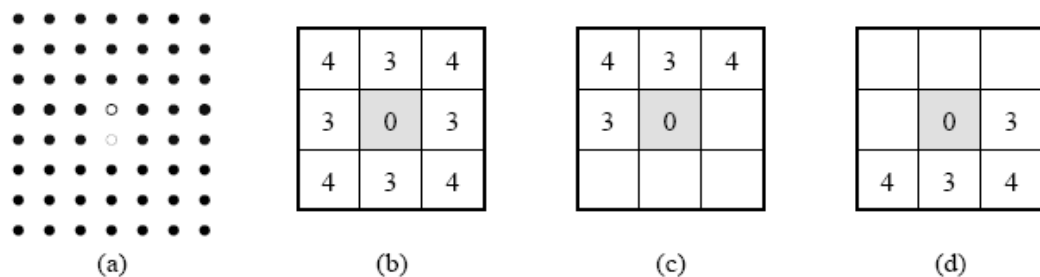


图 3.4.3 串行计算距离变换

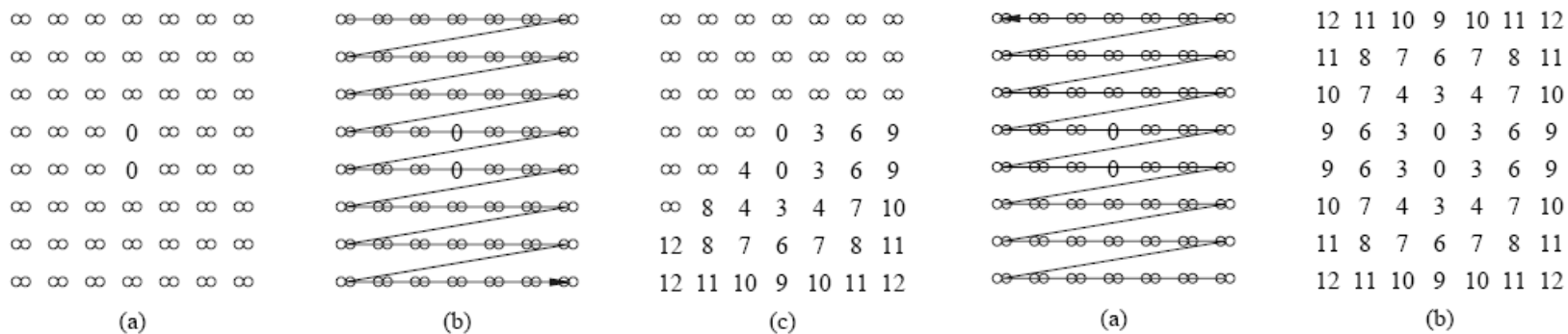


图 3.4.4 前向扫描

图 3.4.5 反向扫描



离散距离变换的实现

□ 并行实现

$$DT^{(t)}(p) = \min_{k,l} \{DT^{(t-1)}(q) + M(k,l); q = (x_p + k, y_p + l)\}$$

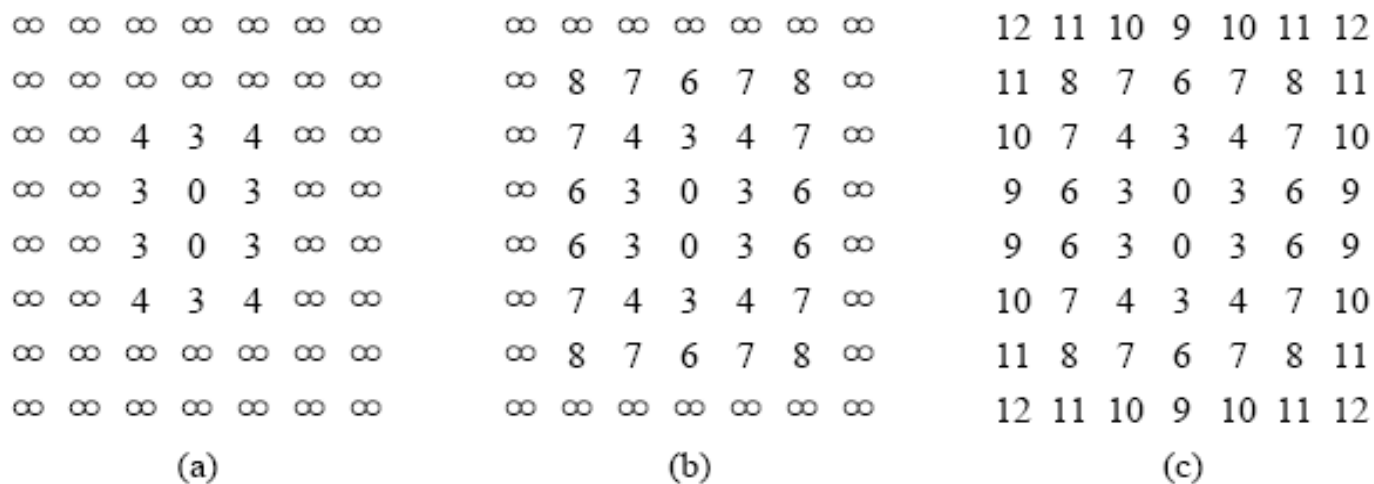


图 3.4.6 并行计算过程中的各个步骤所得到的距离图

3-D距离变换

□ 3-D距离

$$d_E(p, q) = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 + (z_p - z_q)^2}$$

$$d_4(p, q) = |x_p - x_q| + |y_p - y_q| + |z_p - z_q|$$

$$d_8(p, q) = \max\{|x_p - x_q|, |y_p - y_q|, |z_p - z_q|\}$$

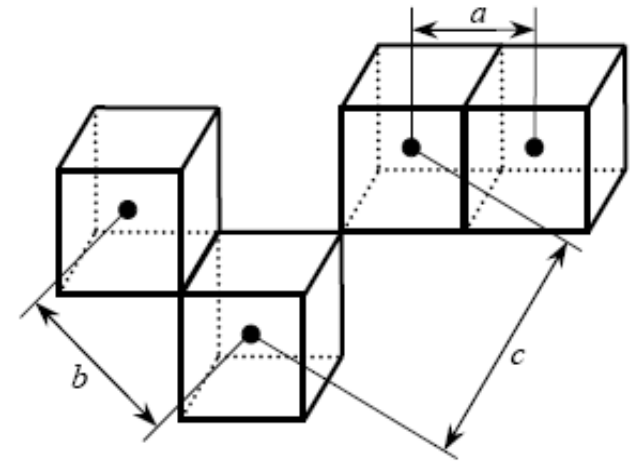


图 3.4.8 3-D 体素间的 3 种距离

3-D距离变换

□ 3-D距离变换的模板

- 前向扫描：从图象第一层的左上角向最后一层的右下角进行

$$\begin{array}{ccc} c & b & c \\ b & a & b \\ c & b & c \end{array} \quad \begin{array}{ccc} b & a & b \\ a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array}$$

图 3.4.9 3-D 前向扫描模板

- 反向扫描：从最后一层的右下角向第一层左上角进行



3-D图象中的连通和拓扑

□ 邻域和连通

■ 邻域的通用定义

设 $\mathbf{x} = (x_0, \dots, x_n)$ 为图象网格上的一个单元 \mathbf{x} 的 V_1^r 邻域定义为:

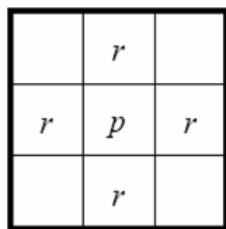
$$V_1^r = \{\mathbf{y} \mid D_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq r\}$$

\mathbf{x} 的 V_∞^r 邻域定义为: $V_\infty^r = \{\mathbf{y} \mid D_\infty(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq r\}$

$$N_4(\mathbf{x}) = V_1^1(\mathbf{x}) \quad N_8(\mathbf{x}) = V_\infty^1(\mathbf{x})$$

3-D图象中的连通和拓扑

□ 2-D像素邻域



(a)

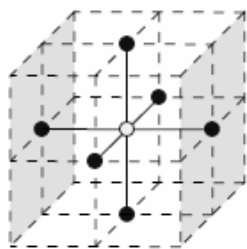


(b)

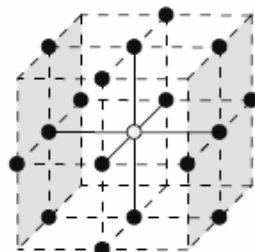
$$N_4(\mathbf{x}) = V_1^1(\mathbf{x})$$

$$N_8(\mathbf{x}) = V_\infty^1(\mathbf{x})$$

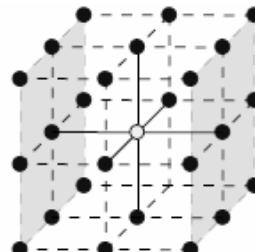
□ 3-D体素邻域



(a)



(b)



(c)

$$N_6(\mathbf{x}) = V_1^1(\mathbf{x})$$

$$N_{18}(\mathbf{x}) = V_\infty^1(\mathbf{x}) \cap V_1^2(\mathbf{x})$$

$$N_{26}(\mathbf{x}) = V_\infty^1(\mathbf{x})$$



3-D图象中的连通和拓扑

□ 像素点连通

- 存在一系列依次连接的象素组成的通路

□ 连通组元

- 完全在一个图象子集中的象素组成的通路上的象素集合构成该图象子集中的一个连通组元

□ 连通集

- 如果 S 中只有1个连通组元，即 S 中所有象素都互相连通，则称 S 是一个连通集