

表面上的毛边带叫做马赫带,是厄恩斯特·马赫在 1865 年首先描述的现象。

第二个现象称为同时对比现象,这与下面的事实有关。即,感觉的亮度区域不是简单地取决于强度,如图 2.8 所示,所有的中心方块都有完全相同的强度。然而,它们出现在眼睛里就变得比较暗,如同背景亮了一样。一个更熟悉的例子是一张纸,当放在桌子上时看上去似乎比较白,但是,当我们用纸来遮蔽眼睛直视明亮的天空时,纸看起来总是黑的。

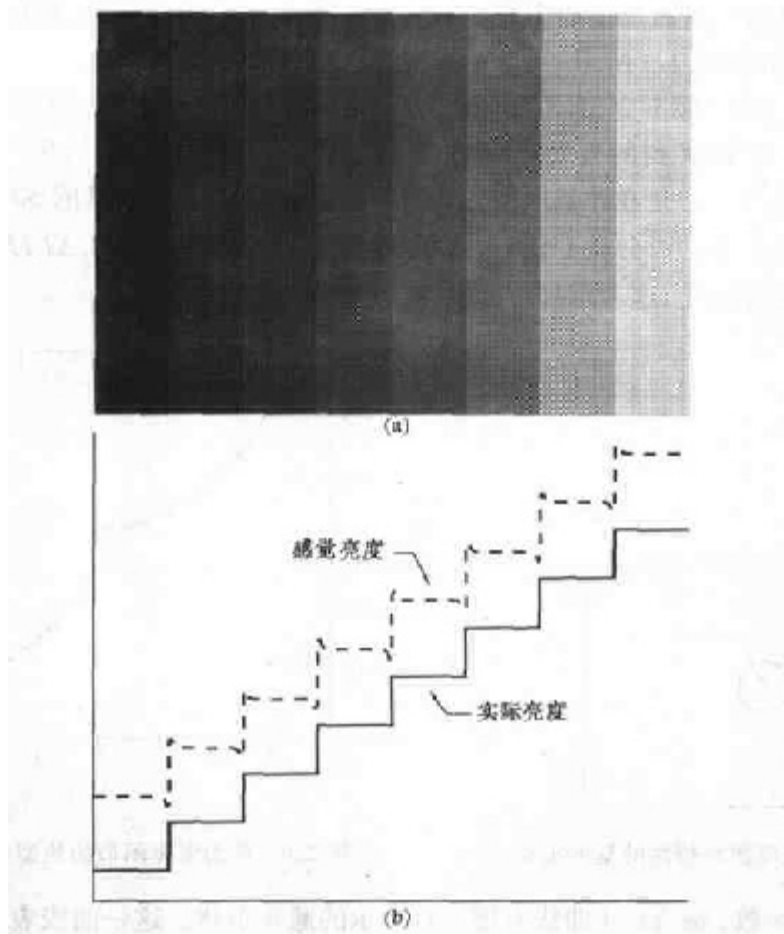


图 2.7 (a)显示感觉亮度不是简单的强度函数的一个例子,在(b)中两条曲线间相对垂直的位置没有特殊含意,只是为了清晰

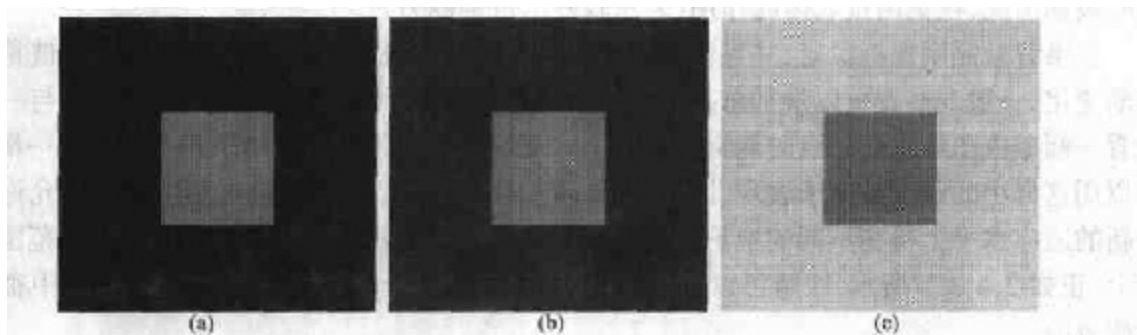


图 2.8 同时对比的例子,所有的中心方块都有相同的强度,但是当背景变亮时,它们就逐渐变暗

人类感知现象的另外一个例子是视觉错觉。在错觉中,眼睛填充上了不存在的信息或者错误地感知物体的几何特点。如图 2.9(a)所示,一个正方形的轮廓看得很清楚,尽管在图像中这些部分并没有线。相同的效果在图 2.9(b)中也可以看到,此时可以看到一个圆,注意到,仅仅是几根线就足以给出一个完整圆的错觉。在图 2.9(c)中两条水平线段长度相同,但是一个显得比另一个短。最后,图 2.9(d)中所有旋转 45° 的线都是等距离的平行线,然而画有交叉影线就产生了错觉,觉得这些线不再平行。视觉错觉是人类视觉系统的一个特性,这一特性尚未完全了解。

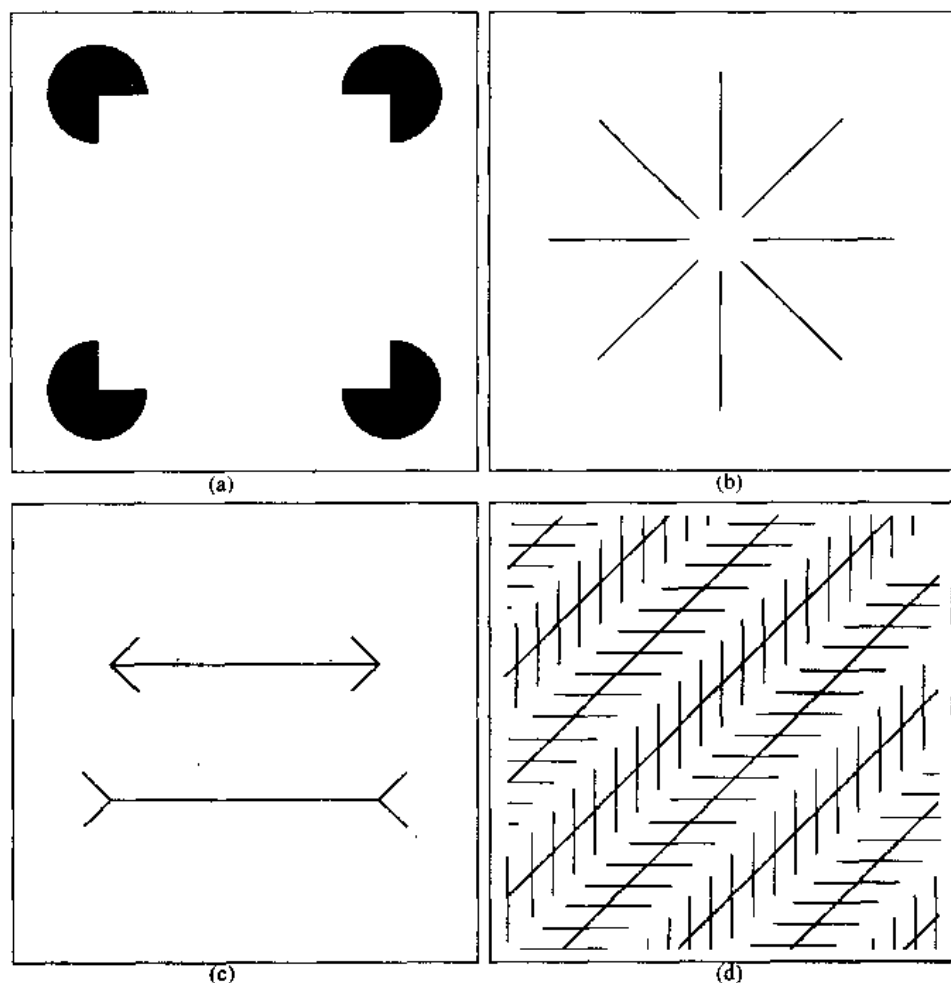


图 2.9 一些典型的视觉错觉

2.2 光和电磁波谱

电磁波谱在 1.3 节中已做过介绍,现在要详细地研究这一问题。1666 年,牛顿发现了这样一个现象:当一束太阳光通过一个玻璃棱镜时,显示的光束不再是白光,而是一端是紫色另一端是红色的连续色谱。如图 2.10 所示,我们感受到的可见光的彩色范围占电磁波的一小部分。在波谱的一端是无线电波,其波长是可见光波长的几十亿倍。波谱的另一端是伽马射线,其波长比可见光小几百万倍。电磁波谱可用波长、频率或能量来描述。波长(λ)和频率(ν)的

关系可用下式描述:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.2.1)$$

这里 c 是光速(2.998×10^8 m/s), 电磁波谱的各种分量由下式给出:

$$E = h\nu \quad (2.2.2)$$

这里 h 是普朗克常数。

波长的单位是米(m), 也常用微米(μm , $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m)和纳米(nm, $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m)来表示。频率用赫兹(Hz)来度量, 1 赫兹表示正弦波每秒 1 个周期。常用的能量单位是电子伏特(eV)。

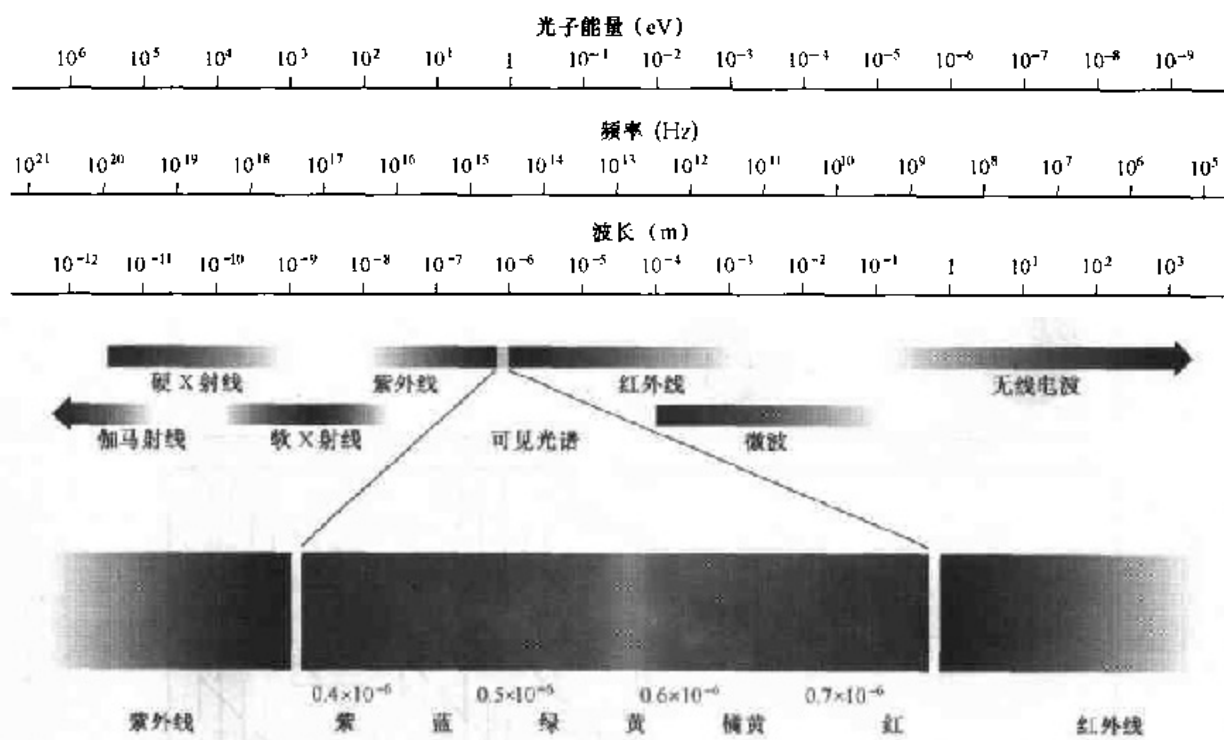


图 2.10 光和电磁波谱图

电磁波可看成是以波长 λ (图 2.11) 传播的正弦波, 或者看做没有质量的粒子流, 该流以波那样的光速传播, 每个粒子包含一定(一束)能量, 每束能量称为光子。从式(2.2.2)可以看出能量与频率成正比, 因此, 高频率(短波长)电磁波每光子携带更多的能量, 无线电波有低能量光子, 微波具有比无线电波多的能量, 红外波还要多。然后, 可见光、紫外线、X 射线和最后的伽马射线都具有最高的能量。这就是伽马射线对活体组织危害很大的原因。

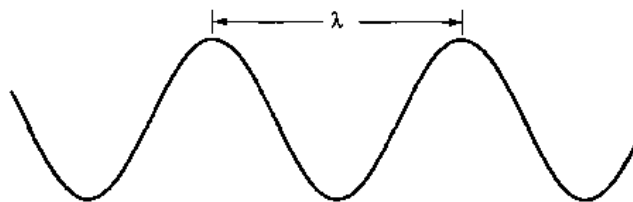


图 2.11 一个波长的图形表示

光是一种特殊的电磁辐射, 人眼可以看见和感觉到它。为便于讨论, 把可见光谱(彩色)段

扩展后示于图 2.10(在第 6 章将更详细地讨论彩色)中。电磁波谱的可见波段大约占据 $0.43\ \mu\text{m}$ (紫色)~ $0.79\ \mu\text{m}$ (红色)的范围。为方便起见,彩色谱分为 6 个波段:紫色、蓝色、绿色、黄色、橘黄色和红色。每个波段(或电磁波谱的其他部分)不是突然终止,而是每一个波段混合平滑地过渡到下一个,如图 2.10 所示。

人从一个物体感受的颜色由物体反射光的性质决定。一个物体若所有反射的可见光波长是相对平衡的,则物体对观察者来说是显示白色。然而,一个物体在可见光谱的有限范围内反射时会呈现各种颜色色调。例如,绿色物体反射波长主要在 $500\sim 570\ \text{nm}$ 范围的光,而吸收其他波长的大部分能量。

没有颜色的光叫消色或单色光。这种光的属性是它的强度或大小。灰度级这一词汇通常用来描述单色光强度,因为它的范围从黑到灰,最后到白。正如前面指出的,彩色光跨越 $0.43\ \mu\text{m}$ (紫色)~ $0.79\ \mu\text{m}$ (红色)的电磁能谱。通常有三个基本量用于描述彩色光源的质量:发光强度、光通量和亮度。发光强度是从光源流出能量的总量,通常用瓦特(W)度量。用流明数(lm)度量的光通量给出观察者从光源感受到的能量。例如,从远红外光谱范围的光源发射出来的光具有实际意义的能量,但观察者却很难感受到它。它的光通量几乎是零。最后,如 2.1 节讨论的那样,亮度是光感受的主观描绘子,它实际上不能测量,包含无色的强度概念,并且也是描述彩色感觉的参数之一。

接着从图 2.10 的讨论,我们注意到,在电磁波谱短波长的一端是伽马射线和硬 X 射线。如 1.3.1 节讨论的那样,伽马辐射对医学和天文学图像很重要,并且对核环境中辐射成像也很重要。硬(高能)X 射线用于工业。胸透 X 射线在软 X 射线区的高能端(短波长),牙科 X 射线在该波段的低能端。软 X 射线波段过渡到远紫外区,又与较长波长的可见光谱混合。进一步向较高波长移动就到达能辐射热的远红外波段,这一现象使它在依靠“热特性”成像的应用中非常有用。红外波段靠近可见光谱的部分叫近红外区。这个波段的对端叫做远红外区。远红外的后部与微波段相接。这个波段是众所周知的微波炉中的能源,但它有许多其他用途,包括通信和雷达。最后,无线电波段包括电视、AM 和 FM 收音机。从一定天体发射的高能无线电信号在天文观测中很有用。1.3 节给出了刚才讨论的多数波段成像的例子。

在原理上,如果可以开发出一种传感器,它可检测由一种电磁波谱发射的能量,就可以在那一波段上对感兴趣的事件成像。但有一点很重要,即“观看”一个物体的电磁波的波长必须小于或等于物体的尺寸。例如,水分子的直径是 $10^{-10}\ \text{m}$,这样,要研究分子,我们需要一个能在远红外或软 X 射线范围发射的光源。这个限制与传感材料的物理特性一起确立了成像传感器(如可见光、红外线和今天使用的其他传感器)功能的基本限制。

虽然成像主要以电磁波发射的能量为基础,但这并不是产生图像的惟一方法,例如,正如 1.3.7 节讨论过的从物体反射的声波可用于形成超声波图像。另外,主要的数字图像源是电子显微镜的电子束和用于图形和可视化的合成图像。

2.3 图像感知和获取

我们感兴趣的各类图像都是由“照射”源和形成图像的“场景”元素对光能的反射或吸收相结合而产生的。把“照射”和“场景”加上引号为了强调是比我们所熟悉的情况(即,可见光源照射各种三维场景)更一般的事实。例如,照射可能由电磁能源引起,如雷达、红外线或 X 射线

能源。但是,正如前面指出的,照射也可以由非传统光源,如超声波,甚至由计算机产生的照射模式产生。类似地,场景可能是熟悉的物体,但是,它们也可能是分子、沉积岩或人类大脑,甚至可以对一个光源成像,如获得太阳的图像。根据光源的性质,照射能量可从物体反射或从物体透射。第一类例子是从平面反射,第二类例子是使 X 光通过病人身体产生一幅 X 光诊断图像。在某些应用中,反射和透射都能聚焦到一个照片转换器上(图像屏幕),该转换器把能量转换为可见光。电子显微镜和伽马成像的应用就使用这种方法。

图 2.12 显示了用来把照射量变为数字图像的三种主要传感器装置。原理很简单,通过将输入电功率和对特殊类型检测能源敏感的传感器材料组合,把输入能源转变为电压。输出电压波形是传感器的响应,同时,一个数字量可从数字化该响应的每个传感器得到。在这一节,将看到图像感知和产生的主要程序,图像数字化将在 2.4 节讨论。

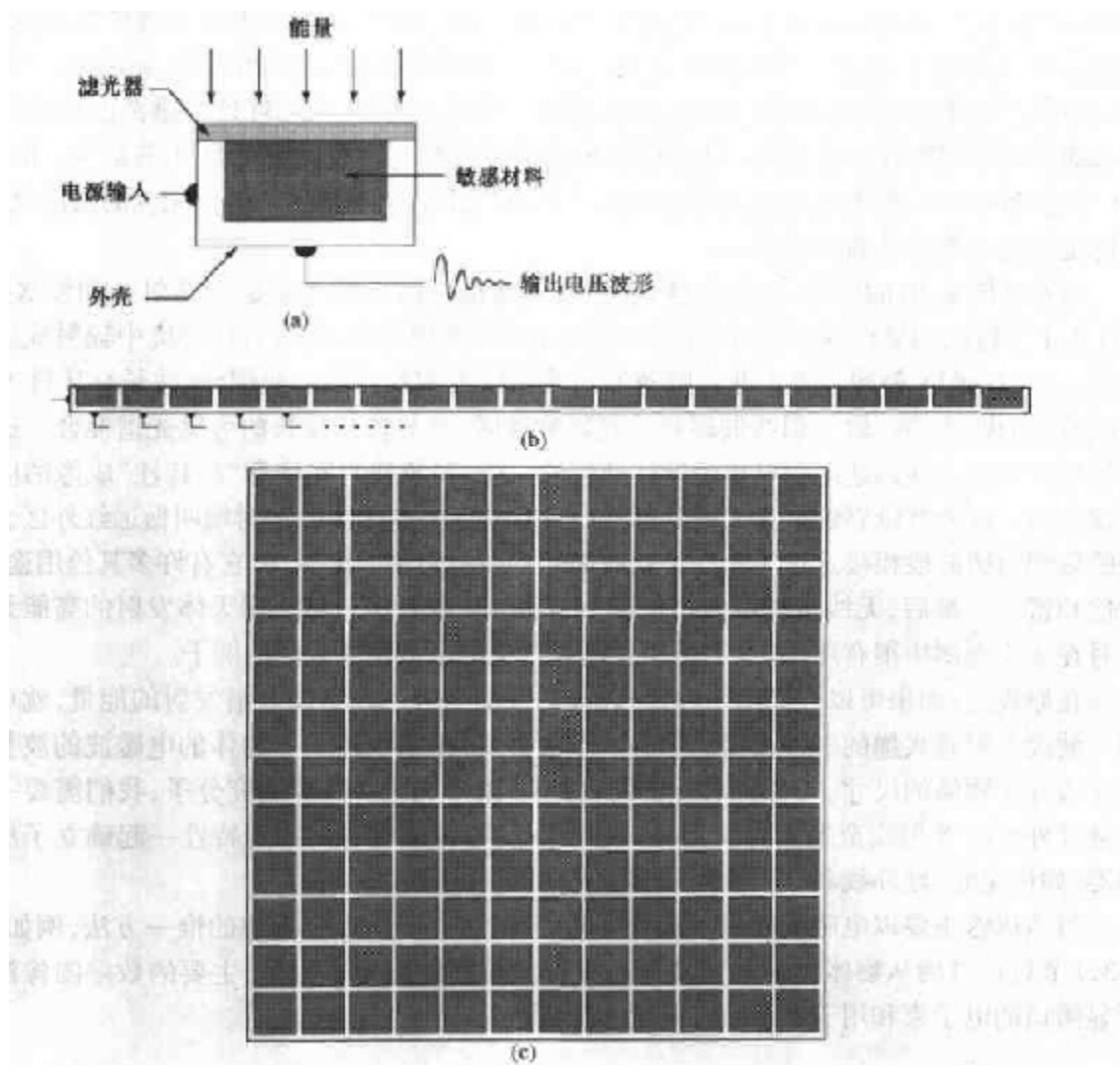


图 2.12 (a)单个成像传感器,(b)线性传感器,(c)传感器阵列

2.3.1 用单个传感器获取图像

图 2.12(a)显示了单个传感器部件。也许最熟悉的这类传感器是光二极管,它由硅材料构成,并且其输出电压波形与光成正比。在传感器前边用一个滤光器改善选择性。例如,在光传

感器前边的绿色(通过)滤光器有利于彩色谱的绿波段光通过。因此,传感器输出的绿光比可见光谱中其他分量要强。

为了用单一传感器产生二维图像,在传感器和成像区之间,还必须在 x 和 y 方向有相对位移。图 2.13 显示了一个用于高精度扫描的装置,这里把一个负片装在一只鼓上,该鼓机械转动提供一维位移。单传感器安装在引导螺杆上,它提供垂直方向上的移动。因为机械运动可高精度地控制,这一方法是得到高分辨率图像的一种廉价方法(但较慢)。另外,类似的机械装置使用一个平面床,而传感器在两个方向线性地移动,这些类型的机械数字化器有时归为微观光密度计一类。

用单一传感器成像的另外一个例子是同时放一个激光源和传感器,用一个镜子来控制发射光束到扫描图形上,同时把激光信号反射到传感器。这个装置也可使用条形或矩形传感器获取图像。这种装置将在后续两节加以讨论。

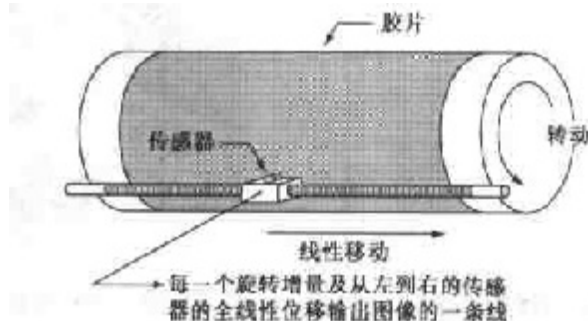


图 2.13 单个传感器组通过运动产生二维图像

2.3.2 用带状传感器获取图像

比单个传感器更常用的几何结构由线状排列的传感器形成的一个传感器带组成,如图 2.12(b)所示,传感器带在一个方向上提供成像单元。相对于传感器带垂直方向的运动在另一方向上成像,如图 2.14(a)所示,这是大多数平板扫描仪所用的装置。感受装置可能有 4 000 或更多的排成直线的传感器。线状传感器常用于航空成像,在这种应用中,成像系统装在一架飞机上,飞机以恒定的高度和速度飞过被成像的地区。可响应各种电磁波谱波段的一维传感器带按与飞机方向垂直的方向安装。成像传感器带一次给出一幅图像的一行,传感器带的运动完成二维图像的另一维。透镜和其他聚焦方法用来把扫描区域投影到传感器上。

以圆环形状安装的传感器带用于医学和工业成像,以得到三维物体的横断面(切片)图像,如图 2.14(b)所示。一个旋转的 X 射线源提供照射,并且相对于射线源的传感器部分收集通过物体的 X 射线能量(很明显,传感器必须是对 X 射线敏感的)。这就是如 1.2 节和 1.3.2 节指出的医学和工业计算机轴向断层成像的基础。重要的一点是,传感器的输出必须由重建算法处理,重建的目的是把感知数据转换为有意义的横截面图像。换句话说,图像不可能从传感器的单一运动直接得到,它们需要进一步处理。由图像堆积组成的数字体由物体与传感器环相垂直方向的运动产生。基于 CAT 原理,其他成像模式包括核磁共振成像(MRI)和正电子发射断层(PET)。照射源、传感器和各种类型的图像是不同的,但是,在概念上,它们的成像方法[示于图 2.14(b)]是非常相似的。

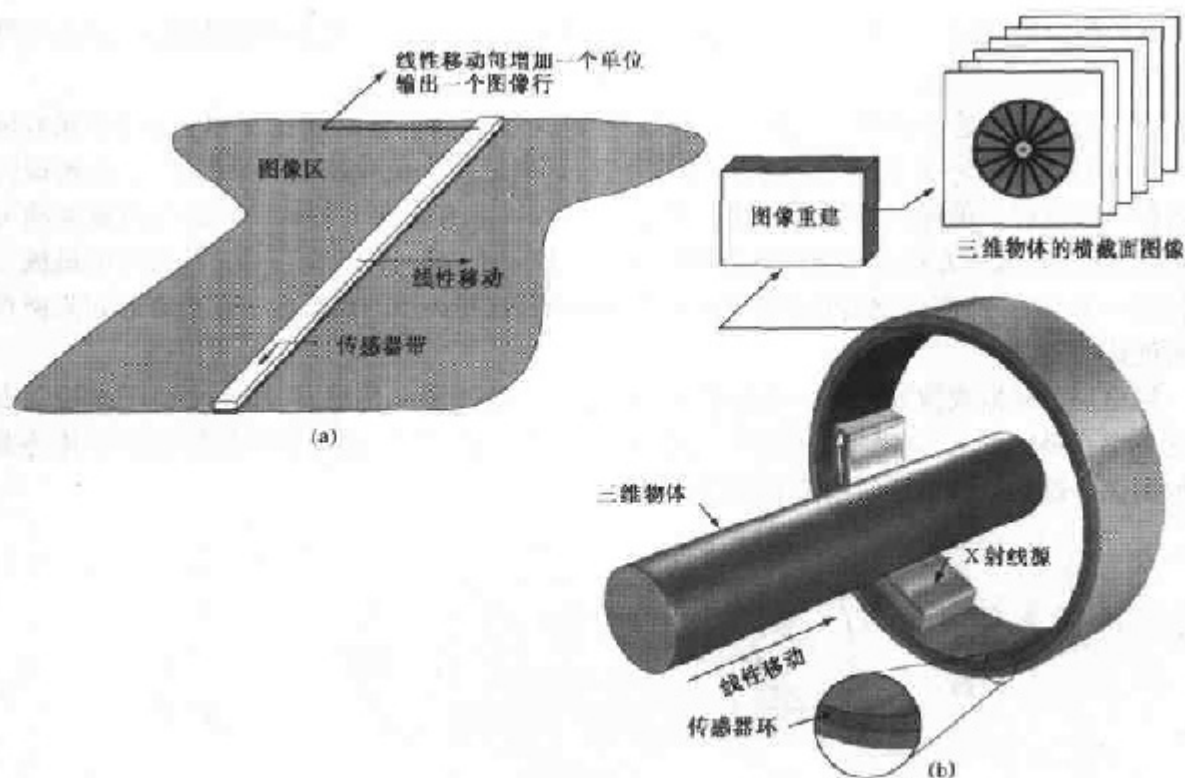


图 2.14 (a)用线性传感器带获取图像,(b)用环形传感器带获取图像

2.3.3 用传感器阵列获取图像

图 2.12(c)显示了独特的以二维阵列形式排列的传感器。大量的电磁波和某种超声波敏感元件常以阵列形式排列。这也是在摄像机上常见的主要结构。这些摄像机的典型传感器是 CCD 阵列。该种阵列可用宽带且具有敏感特性的元件制造并封装为 $4\,000 \times 4\,000$ 或更多单元的阵列。CCD 传感器广泛地运用于数字摄像机和其他光敏感设备中。每一个传感器的响应正比于投射到传感器表面的光能总量。这一特点被用于天文学和其他要求低噪声图像的应用中。采用让传感器累积输入的光信号超过几分钟甚至几小时的方法可达到减少噪声的目的(在第 3 章讨论用累积法减少噪声)。图 2.15(c)所示的传感器阵列是二维的,它的主要优点是,把图形能量聚焦到阵列表面得到完整的图像。很明显,像前面两节讨论的传感器结构那样的运动是不需要的。

在这样的传感器阵列中应用的主要方法示于图 2.15。该图显示了来自照射源通过场景(单元)反射的能量,但是,正如本节开始提到的,该能量也可以通过场景单元传送。示于图 2.15(c)的成像系统的第一种功能是收集入射能量并把它聚焦到一个图像平面上。如果照射的是光,则成像系统终端前面是一个透镜,透镜把观察场景投影到透镜的聚焦平面上,如图 2.15(d)所示。与焦点面相重合的传感器阵列产生与每一个传感器接收光总量成正比的输出。数字成模拟电路扫描这些输出,并把它们转换成电视信号,然后由成像系统的其他部分数字化,如图 2.15(e)所示输出数字图像。把一幅图像转换为数字图像是 2.4 节的话题。

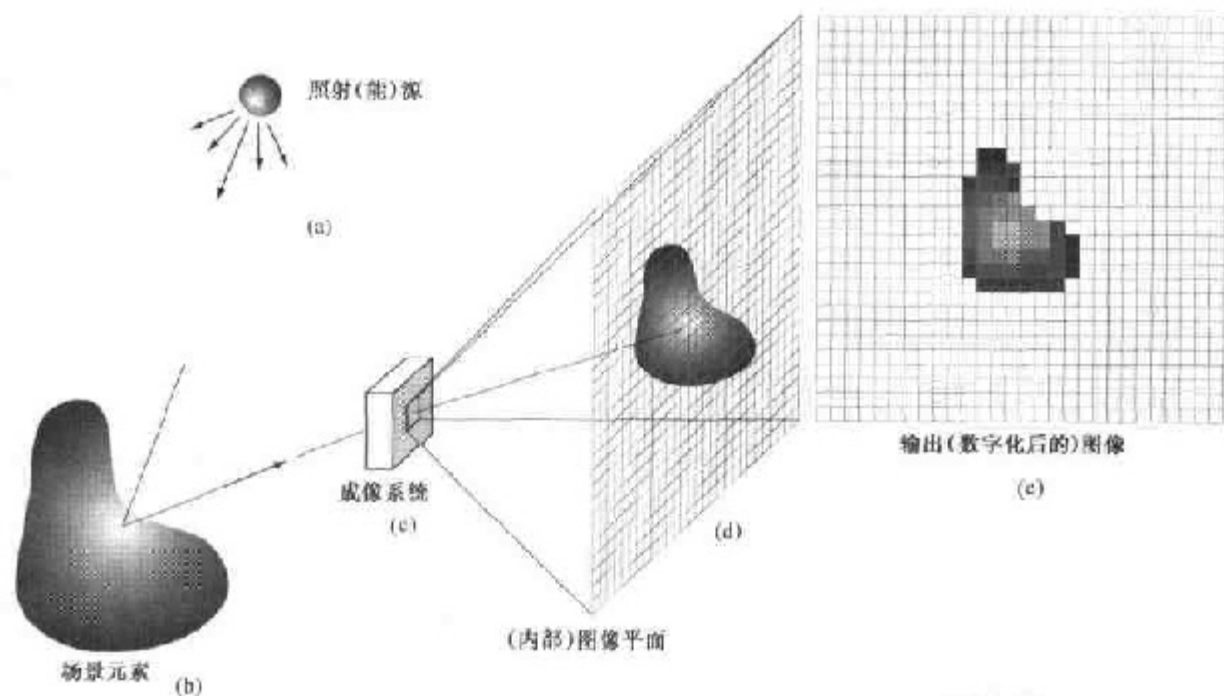


图 2.15 数字图像获取过程的例子。(a) 照射(能)源,(b)场景元素,(c)成像系统,(d)场景投影到图像平面,(e)数字化图像

2.3.4 简单的图像形成模型

用 $f(x, y)$ 二维函数形式表示图像, 在特定的坐标 (x, y) 处, f 的值或幅度是一个正的标量, 其物理意义由图像源决定。在本书中的大多数图像是单色图像, 图像值如 2.2 节讨论的那样可称为灰度级。当一幅图像从物理过程产生时, 它的值正比于物理源的辐射能量(如电磁波)。因此, $f(x, y)$ 一定是非零和有限的, 这就是:

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (2.3.1)$$

函数 $f(x, y)$ 可由两个分量来表征: (1) 入射到观察场景的光源总量和 (2) 场景中物体反射光的总量。相应地称为入射分量和反射分量, 并分别表示为 $i(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 。两个函数合并形成 $f(x, y)$:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (2.3.2)$$

这里

$$0 < i(x, y) < \infty \quad (2.3.3)$$

$$0 < r(x, y) < 1 \quad (2.3.4)$$

式(2.3.4)指出反射分量限制在 0(全吸收)和 1(全反射)之间。 $i(x, y)$ 的性质取决于照射源, 而 $r(x, y)$ 取决于成像物体的特性。应指出这种表示方式还可应用于照射光通过一个媒体形成图像的情况, 如胸透 X 光片。在这种情况下, 应该用透射函数代替反射函数, 但其限制应该与式(2.3.4)相同, 并且形成的图像函数应该如式(2.3.2)的乘积形式。

例 2.1 照射和反射的某些典型值

式(2.3.3)和式(2.3.4)给出的值是理论界限。对于可见光, 下面的平均数字表明了 $i(x, y)$ 的典型范围。在晴朗的白天, 太阳在地球表面产生的照度超过 $90\,000 \text{ lm/m}^2$ 。在有云的

情况下这个数值下降到 $10\ 000\ \text{lm/m}^2$ 。在晴朗的夜晚,满月的情况下大约为 $0.1\ \text{lm/m}^2$ 的照度。类似地,下面是 $r(x, y)$ 的某些典型值:黑天鹅绒为 0.01,不锈钢为 0.65,白色墙为 0.80,镀银金属为 0.90,雪为 0.93。

如 2.2 节提到的,我们称单色图像在任何坐标 (x_0, y_0) 处的强度为图像在那一点的灰度级 (l),即:

$$l = f(x_0, y_0) \quad (2.3.5)$$

很显然,从式(2.3.2)到式(2.3.4), l 位于下列范围:

$$L_{\min} \leq l \leq L_{\max} \quad (2.3.6)$$

理论上, $L_{\min}$ 的要求仅仅是正的, $L_{\max}$ 要求为有限值。实际上, $L_{\min} = i_{\min} r_{\min}$ 和 $L_{\max} = i_{\max} r_{\max}$ 。参考前面提到的平均照度和反射值范围,我们希望, $L_{\min} \approx 10$, $L_{\max} \approx 1\ 000$ 作为没有附加照明的室内值的典型限制。

区间 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 称为灰度级。实际常常令该区间为 $[0, L-1]$, 这里 $l=0$ 为黑, $l=L-1$ 在灰度级中为白。所有中间值是从黑到白的各种灰色调。

2.4 图像取样和量化

从前面的讨论,我们看到有几种获取图像的方法,在所有这些方法中我们的目的是相同的,就是从感知的数据中产生数字图像。大多数传感器的输出是连续电压波形,这些波形的幅度和空间特性都与感知的物理现象有关。为了产生一幅数字图像,需要把连续的感知数据转换为数字形式。这包括两种处理:取样和量化。

2.4.1 取样和量化的基本概念

图 2.16 说明了取样和量化的基本概念。图 2.16(a) 显示了一幅连续图像 $f(x, y)$, 我们想把它转换为数字形式。一幅图像的 x 和 y 坐标及幅度可能都是连续的。为了把它转换为数字形式,必须在坐标和幅度上都做取样操作。数字化坐标值称为取样,数字化幅度值称为量化。

示于图 2.16(b) 的一维函数是图 2.16(a) 中沿线段 AB 的连续图像幅度值(灰度级)的曲线。随机变化是由图像噪声引起的。沿 AB 线段等间隔对该函数取样,如图 2.16(c) 所示。每个取样位置由图底部的垂直小线段给出。取样如放在函数曲线上的白色小方块所示。这一组离散位置给出了取样函数。然而,取样值在灰度级值上还是连续分布的。为了形成数字函数,灰度值也必须转变为离散值(数字化)。图 2.16(c) 的右侧显示了分为 8 个离散级别的灰度级标尺,其范围从黑到白,垂直面上的小线段标记指示赋予 8 级灰度的每一级一特定值。每一取样的连续灰度值简单量化为 8 个离散灰度级中的一个。赋值是样值对小标记在垂直方向上所做的近似。由取样和量化产生的数字样值示于图 2.16(d) 中。从图像的顶点开始逐行执行这一过程产生一幅二维数字图像。

按刚刚讨论的方式取样,假定有一幅在两个坐标方向和幅度上都连续的图像。实际上,取样方法由用于产生图像的传感器装置决定。如图 2.13 所示,当一幅图像由单一感知单元结合机械运动产生时,传感器的输出用前边讨论的方式量化。然而,通过选择各个机械增量的数值来完成取样,在取样处激活传感器收集数据。机械运动可以非常精确地实现,原理上,用多么

精细的程度对一幅图像取样并没有限制。然而,实际限制由在传感器上聚焦光照点的光学设备的不完善决定,光点与机械位移所能达到的精细分辨率是不一致的。

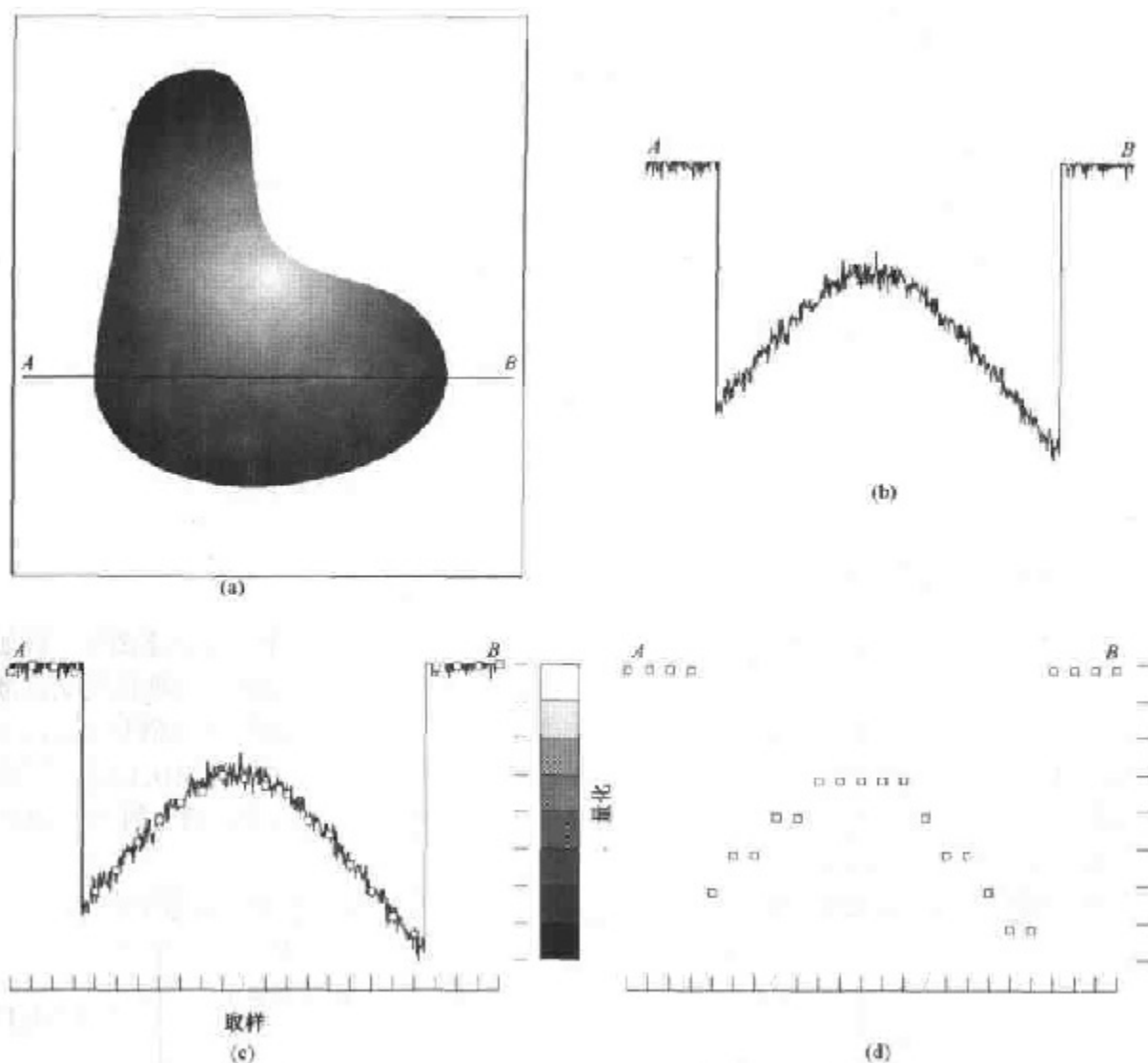


图 2.16 产生一幅数字图像。(a)连续图像,(b)在连续图像中用从 A 到 B 的扫描线来说明取样和量化的概念,(c)取样和量化,(d)数字扫描线

当用感知带获取图像时,带中传感器的数目由在一个方向上的取样限制决定。在另一个方向上的机械运动可控制得更精确一些,但是,试图在一个方向上达到某个取样密度(该密度超过了在另一个方向上由传感器数目决定的取样限制)几乎没有意义。传感器输出的量化完成了产生数字图像的过程。

当感知阵列用于图像获取时,没有运动且阵列中传感器的数量决定在两个方向上的取样限制。传感器输出的量化与前述相同,图 2.17 说明了这个概念。

图 2.17(a)显示了投影到一阵列传感器平面上的连续图像。图 2.17(b)显示了取样和量化后的图像。很明显,数字图像的质量很大程度上取决于取样和量化中所用的取样数和灰度级。然而,正如 2.4.3 节显示的那样,在选择这些参数时,图像内容是一个重要考虑因素。