

图 1.23 中任何一级的输出执行。还注意到不是所有的图像处理应用都需要图 1.23 所指出的复杂交互。事实上,在某些情况下并不是所有那些模块都需要。例如,为了人的视觉解释,图像增强很少需要使用图 1.23 中的其他任何步骤。然而,通常随着图像处理任务复杂度的增加要求做更多处理才能解决问题。

1.5 图像处理系统的部件

20 世纪 80 年代中叶,世界各地售出的各种型号的图像处理系统,确切地说,基本都是由主机及与主机相配合的外设装置构成。20 世纪 80 年代末 90 年代初,市场已转为将图像处理硬件设计为与工业标准总线兼容并能配合工程工作站机箱和个人计算机的单板形式。除了降低价格外,这一市场还如催化剂一样出现了大量的新公司,这些公司的任务是开发用于图像处理的软件。

虽然针对大规模图像应用(如处理卫星图像)的大规模图像处理系统一直在出售,但趋势朝着小型化和通用化的小型机并带有专用图像处理软件的混合型系统方向发展。图 1.24 显示了用于数字图像处理的典型通用系统的组成部件。每一部分的功能在下面的段落从图像感知开始进行讨论。

关于感知,需要两个部件以获取数字图像。第一个是物理设备,该设备对我们希望成像的物体发射的能量很敏感。第二个称之为数字化器,数字化器是一种把物理感知装置的输出转换为数字形式的设备。例如,在数字视频摄像机中,传感器产生一个与光强成比例的输出,数字化器把该输出转化为数字数据。这一题目的某些细节包含在第 2 章中。

特殊的图像处理硬件通常由刚刚谈到的数字化器与执行其他原始操作[如算术逻辑单元(ALU)]的硬件组成,算术逻辑单元对图像执行并行操作。一个使用 ALU 的例子是与数字化一样快的图像取平均操作,这一操作的目的是降低噪声。有时这种类型的硬件叫做前端子系统,它的显著特点是速度快。换句话说,这个单元执行数据需要快速通过的功能[例如,在 30 帧/秒的速度下数字化和求视频图像的平均值],典型的主机不能胜任该工作。

在图像处理系统中的计算机是通用的计算机,其范围从 PC 机到超级计算机。有时在专门应用中,也采用特殊设计的计算机以达到所要求的性能水平。但是,这里感兴趣的还是通用图像处理系统。在这些系统中,几乎任何配置较好的 PC 机对于离线图像处理任务都是适合的。

图像处理软件由执行特殊任务的特殊模块组成。一个设计优良的软件包还包括为用户写代码的能力。如最小化就使用专用模块完成。完善的软件包允许那些模块和至少用一种计算机语言编写的通用软件命令集成。

大规模存储能力在图像处理中是必需的。一幅图像的尺寸是 1024×1024 像素,每像素的亮度是 8 比特,如果图像不压缩需 1 MB 的存储空间。当处理 1 千甚至 1 百万幅图像时,在图像处理系统中很难提供足够的存储空间。图像处理应用的存储分成三个主要类别:(1)用于处理时的短期存储;(2)关系到快速调用的在线存储;(3)档案存储,其特点是频繁访问。存储是以字节(B),千字节(KB),兆字节(MB),吉字节(GB),太字节(TB)为单位的。

提供短期存储的一种方法是使用计算机内存。另一种方法采用专门的板,该存储板叫做帧缓存(缓冲存储器),它们可以存储一帧或多帧图像并可快速访问,通常以视频速率

(30 帧/秒)访问。后一种方法允许实际意义上的快速图像变焦以及卷动(垂直移动)和摇(水平移动)。帧缓存通常放在专业的图像处理硬件单元中,如图 1.24 所示。在线存储一般采取磁盘或光介质存储。在线存储的关键特性参数是对存储数据的访问频率。最后,档案存储是以海量存储要求为特点的,但无需频繁访问。放在类似于投币电唱机的盒子内的磁带和光盘是通常使用的档案存储介质。

今天使用的图像显示器主要是彩色电视监视器(更好一些的平面屏幕)。监视器由图像和图形显示卡驱动,它们是计算机系统的组成部分。对于图像显示应用不可能没有这样的要求,即作为计算机系统的一部分,其显示卡应满足商用性要求,在有些场合还要求立体显示。立体显示是采用戴在用户头上的头盔(目镜上嵌有两个小的显示屏)来实现的。

用于记录图像的硬拷贝装置包括激光打印机、胶片照相机、热敏装置、喷墨装置和数字单元(如 CD-ROM)等。胶片的分辨率最高,但相纸作为记录材料是首要选择的介质。为了描述图像,图像可显示在透明胶片上或者使用图像投影设备显示在数字介质上。后面的方法作为图像描述标准正在被接受。

网络在今天所用的计算机系统中几乎都是默认的功能,因为大数据量在图像处理中是固有的,在图像传输中主要考虑的问题是带宽。在专用网络中这不是一个典型问题,但通过互联网远程通信就不是总有效的了。幸运的是,这一状况由于光纤和其他宽带技术的发展,正在迅速得到改进。

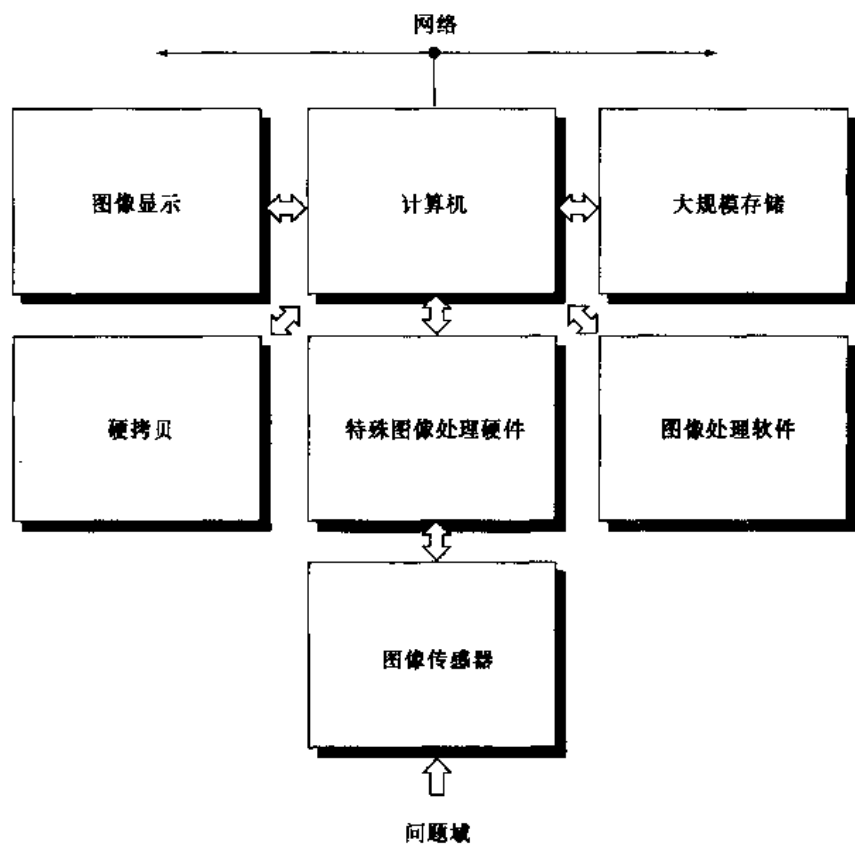


图 1.24 通用图像处理系统组成

小结

本章提供的材料主要是,对数字图像处理的起源、重要意义、该技术当前及未来的应用领域提供一个概括性的介绍。由于篇幅所限,本章中涉及课题的覆盖面必然不太全面,但是在数字图像处理的宽度和应用范围方面应该给读者留下了一个总体印象。在后面的章节中,将进行图像处理的理论 and 应用方面的阐述,并提供大量的实例进一步理解这些技术的使用。学习完本书后,读者将对数字图像处理的基础内容有一个全面了解。

参考资料

位于后续各章末尾的参考资料部分列出了那些章节讨论过的文献,并在本书末尾的“参考文献”中统一列出。然而,为了在这一章集中汇总一下关于图像处理和相关题目的材料所出自的杂志,我们采取不同的形式。这里还提供了—个书目列表,以便读者可以快速了解本领域的历史和当前的发展动态。这一章引用的参考材料主要是图像处理方面的一般目的、容易理解的文献。

关于图像处理及相关题目的主要参考杂志包括: *IEEE Transactions on Image Processing*; *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*; *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* (1991 年前); *Computer Vision and Image Understanding*; *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*; *Artificial Intelligence*; *pattern Recognition*; *Pattern Recognition Letters*; *Journal of the Optical Society of America* (1984 年前); *Journal of the Optical Society of America—A: Optics, Image Science and Vision*; *Optical Engineering*; *Applied Optics—Information Processing*; *IEEE Transaction on Medical Imaging*; *Journal of Electronic Imaging*; *IEEE Transactions on Information Theory*; *IEEE Transactions on Communications*; *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*; *Proceedings of the IEEE*; 以及 1980 年前的 *IEEE Transactions on Computer* 的文章。国际光学工程协会的出版刊物也很重要。

下面按年代反序列出的书籍包含了数字图像处理方面的补充材料(更偏重于近年来出版的书籍)。这些书籍描述了该领域在过去 30 年总的观点,同时选择了各种形式的论著。覆盖范围从基础理论的教科书到提供技术依据的手册,并包含了该领域当前研究的代表性材料与书籍。

Duda, R. O., Hart, P. E., and Stork, D. G. [2001]. *Pattern Classification*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY.

Pratt, W. K. [2001]. *Digital Image Processing*, 3rd ed., John Wiley & Sons, NY.

Ritter, G. X. and Wilson, J. N. [2001]. *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Shapiro, L. G. and Stockman, G. C. [2001]. *Computer Vision*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Dougherty, E. R. (ed.) [2000]. *Random Processes for Image and Signal Processing*, IEEE Press, NY.

Etienne, E. K. and Nachtgael, M. (eds.) [2000]. *Fuzzy Techniques in Image Processing*,

- Springer-Verlag, NY.
- Goutsias, J, Vincent, L., and Bloomberg, D. S. (eds.). [2000]. *Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Mallot, A. H. [2000]. *Computational Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Marchand-Maillet, S. and Sharaiha, Y. M. [2000]. *Binary Digital Image Processing: A Discrete Approach*, Academic Press, NY.
- Mitra, S. K. and Sicuranza, G. L. (eds.) [2000]. *Nonlinear Image Processing*, Academic Press, NY.
- Edelman, S. [1999]. *Representation and Recognition in Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. [1999]. *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, NY.
- Mather, P. M. [1999]. *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction*, John Wiley & Sons, NY.
- Petrou, M. and Bosdogianni, P. [1999]. *Image Processing: The Fundamentals*, John Wiley & Sons, UK.
- Russ, J. C. [1999]. *The Image Processing Handbook*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL.
- Smirnov, A. [1999]. *Processing of Multidimensional Signals*, Springer-Verlag, NY.
- Sonka, M., Hlavac, V., and Boyle, R. [1999]. *Image Processing, Analysis, and Computer Vision*, PWS Publishing, NY.
- Umbaugh, S. E. [1998]. *Computer Vision and Image Processing: A Practical Approach Using CVIptools*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Haskell, B. G. and Netravali, A. N. [1997]. *Digital Pictures: Representation, Compression, and Standards*, Perseus Publishing, NY.
- Jahne, B. [1997]. *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*, Springer-Verlag, NY.
- Castleman, K. R. [1996]. *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Geladi, P. and Grahn, H. [1996]. *Multivariate Image Analysis*, John Wiley & Sons, NY.
- Bracewell, R. N. [1995]. *Two-Dimensional Imaging*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Sid-Ahmed, M. A. [1995]. *Image Processing: Theory, Algorithms, and Architectures*, McGraw-Hill, NY.
- Jain, R., Rangachar, K., and Schunk, B. [1995]. *Computer Vision*, McGraw-Hill, NY.
- Mitiche, A. [1994]. *Computational Analysis of Visual Motion*, Perseus Publishing, NY.
- Baxes, G. A. [1994]. *Digital Image Processing: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, NY.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. [1992]. *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Haralick, R. M. and Shapiro, L. G. [1992]. *Computer and Robot Vision*, vols. 1 & 2, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Pratt, W. K. [1991]. *Digital Image Processing*, 2nd ed., Wiley-Interscience, NY.
- Lim, J. S. [1990]. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Jain, A. K. [1989]. *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

- Schalkoff, R. J. [1989]. *Digital Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, NY.
- Giardina, C. R. and Dougherty, E. R. [1988]. *Morphological Methods in Image and Signal Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Levine, M. D. [1985]. *Vision in Man and Machine*, McGraw-Hill, NY.
- Serra, J. [1982]. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, NY.
- Ballard, D. H. and Brown, C. M. [1982]. *Computer Vision*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Fu, K. S. [1982]. *Syntactic Pattern Recognition and Applications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Nevatia, R. [1982]. *Machine Perception*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Pavlidis, T. [1982]. *Algorithms for Graphics and Image Processing*, Computer Science Press, Rockville, MD.
- Rosenfeld, R. and Kak, A. C. [1982]. *Digital Picture Processing*, 2nd ed., vols. 1 & 2, Academic Press, NY.
- Hall, E. L. [1979]. *Computer Image Processing and Recognition*, Academic Press, NY.
- Gonzalez, R. C. and Thomason, M. G. [1978]. *Syntactic Pattern Recognition: An Introduction*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Andrews, H. C. and Hunt, B. R. [1977]. *Digital Image Restoration*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Pavlidis, T. [1977]. *Structural Pattern Recognition*, Springer-Verlag, NY, 1977.
- Tou, J. T. and Gonzalez, R. C. [1974]. *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1974.
- Andrews, H. C. [1970]. *Computer Techniques in Image Processing*, Academic Press, NY.

第2章 数字图像基础

本章主要介绍一些与数字图像相关的概念和贯穿全书的一些标记符号。2.1节简单地综述了人类视觉系统的构造,包括眼中图像的形成及对亮度的适应和鉴别能力。2.2节讨论光、电磁波谱的其他分量和它们的成像特点。2.3节讨论成像传感器及怎样用它们产生数字图像。2.4节介绍均匀图像取样及灰度量化的概念。在这部分还讨论了数字图像表示、图像中取样数目和灰度级变化的影响、与取样有关的重要现象及图像放大、缩小的技术。2.5节处理一些在全书都要用到的像素间的基本关系。最后,2.6节定义了线性操作的条件。正如本节指出的,线性算子在图像处理技术中起着核心作用。

2.1 视觉感知要素

虽然数字图像处理领域建立在数学和概率统计表示法的基础上,但人的直觉和分析相比之下在选择一种技术时起到核心作用。这种选择常常是主观的视觉判断。因此,大概了解一下人类的视觉感知应作为学习全书的第一步。鉴于这一议题的复杂性和广度,我们仅仅涉及人类视觉最基本的方面。特别是,我们把兴趣放在人眼中形成图像的机理与参数上。这里将通过用于数字图像处理的一些因素去了解人类视觉的物理限制。例如,在分辨率和对照明变化的适应能力方面怎样对人类和电子图像进行比较,这些内容不仅有趣,而且从实践的观点看也是很重要的。

2.1.1 人眼的构造

图2.1显示了人眼简化了的横截面。眼睛的形状近似于一个圆球,其平均直径大约为20 mm。有三层薄膜包围着眼睛,即眼角膜和巩膜外壳,脉络膜和视网膜。角膜是一种硬而透明的组织,它覆盖着眼睛的前表面。与角膜相连的巩膜是一层包围着眼球剩余部分的不透明膜。

脉络膜位于巩膜的下面,这层膜包含有血管网,它是眼睛的重要滋养源。即使是对脉络膜表面的损害(这种损害常常认为并不严重)也有可能严重地损害眼睛。脉络膜外壳着色很重,因此,有助于减少进入眼内的外来光和眼球内反向散射光的数量。在脉络膜的最前面分为睫状体和虹膜。虹膜的收缩和扩张控制着进入眼睛的光量。虹膜中间开口处(瞳孔)的直径是可变的,大约在2~8 mm的范围。虹膜的前部有眼睛的可见色素,而后部则有黑色素。

晶状体是由同心的纤维细胞层组成并由附在睫状体上的纤维悬挂着。晶状体包含60%~70%的水,6%的脂肪和比眼睛中任何其他组织都多的蛋白质。晶状体由稍黄的色素着色,其颜色随着年龄的增加而加深。在极端情况,晶状体会过于混浊,这通常是由白内障等疾病引起的,可能导致低下的彩色辨别能力和视觉清晰度的损失。晶状体吸收大约8%的可见光谱,对短波长光有较高的吸收率。在晶状体结构中,蛋白质吸收红外光和紫外光,并且过量会伤害眼睛。

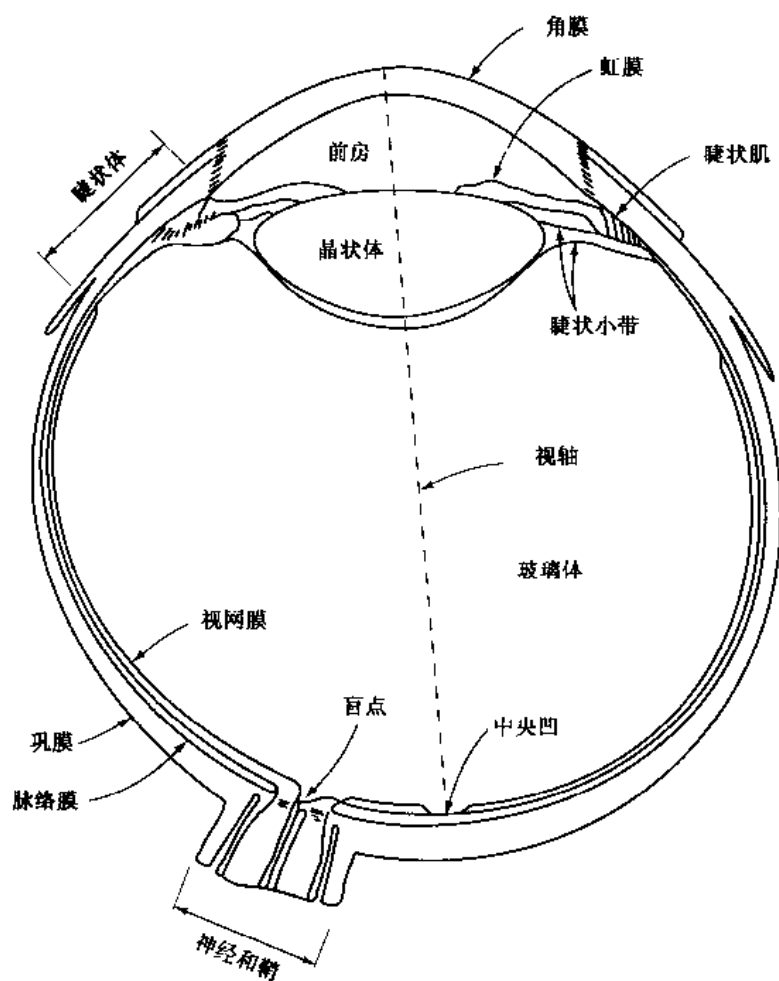


图 2.1 人眼横截面简图

眼睛最里面的膜是视网膜,它布满了整个后部的内壁。当眼球适当地聚焦时,来自眼睛外部的光在视网膜上成像。在视网膜表面分布的分离光接收器提供了图案视觉。这种光接收器分为两类:锥状体和杆状体。每只眼睛的锥状体数目在 600 万到 700 万之间。它们主要位于视网膜的中间部分,称之为中央凹,且对颜色灵敏度很高。用这些锥状体,人们可以充分地分辨图像细节,因为每一个锥状体都连接到自身的神经末端。肌肉控制眼球转动,直到感兴趣的物体图像落到中央凹上。锥状视觉叫做白昼视觉或亮光视觉。

杆状体数目更多,约有 7 500 万到 15 000 万个杆状体分布在视网膜表面。由于分布面积较大而且几个杆状体连接到一个神经末端,因此,减少了这些接收器感知细节的数量。杆状体用来给出视野内一般的总体图像。它们没有彩色感觉,而在低照明度下对图像较敏感。例如,在白天呈现鲜明色彩的物体,在月光下都没有颜色,因为此时只有杆状体受到刺激。这个现象就是众所周知的夜视觉或叫做暗视觉。

图 2.2 显示了右眼中通过眼睛光神经应急区的横截面的杆状体和锥状体密度。在这一区域没有接收器导致所谓的盲点(见图 2.1)。除了这一区域,接收器的分布是沿视线关于中央凹对称的。接收器密度从中央凹的度数来度量(即:离开轴的度数由视轴和通过晶状体中心相交于视网膜的直线形成的角度决定)。注意,图 2.2 中锥状体在视网膜中心最密(在中央凹的

中心区)。应注意到,杆状体从中心向外,离轴大约 20° 处,密度逐渐增加,然后向外到视网膜的边缘处密度逐渐下降。

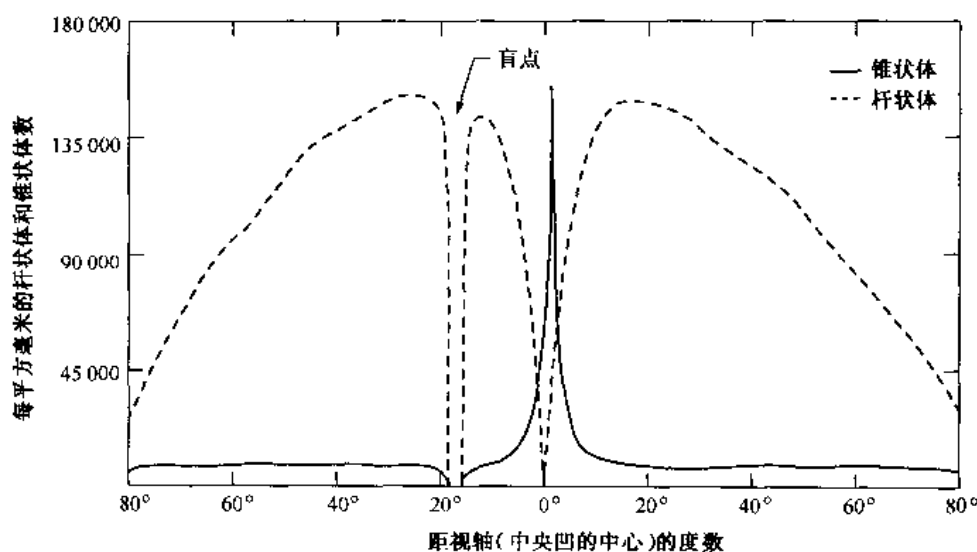


图 2.2 视网膜上杆状体和锥状体的分布

中央凹本身是在视网膜上直径约 1.5 mm 的凹坑。然而,在后续的讨论中,把它近似为方形或矩形的敏感元素的阵列更有用。这样,在描述上比较灵活,可以把中央凹作为大小为 $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的方形传感器阵列观察。在视网膜这一区域中,锥状体的密度大约为每平方毫米 150 000 个元素。基于这一近似,眼睛中最高敏感区域的锥状体数量约为 337 000 个元素。从分辨率的观点看,恰好是一个电荷耦合元件(CCD)中等分辨率的成像芯片可有这个数量的元素,且接收器阵列不大于 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。尽管人类的智慧和视觉经验使这种比较并不恰当,但在当前电子成像传感器领域进一步讨论人眼分辨细节的基本能力时,这种比较是应肯定的。

2.1.2 眼睛中图像的形成

眼睛的晶状体和普通光学透镜之间的主要差别在于前者的适应性强。正如图 2.1 所表明的,晶状体前表面的曲率半径大于后表面的曲率半径。晶体状形状由睫状体韧带和张力来控制。为了对远方的物体聚焦,控制肌肉使晶状体相对比较扁平。同样,为对眼睛近处的物体聚焦,肌肉会使晶状体变得较厚。

当晶状体的折射能力由最小变到最大时,晶状体的聚焦中心与视网膜间的距离由 17 mm 缩小到 14 mm 。当眼睛聚焦到远于 3 m 的物体时,晶状体的折射能力最弱。当眼睛聚焦到非常近的物体时,晶状体的折射能力最强。这一信息使得很容易计算出任何图像在视网膜上形成图像的大小。例如,图 2.3 中,观察者正在看一棵高 15 m ,距离 100 m 的树。如果 h 为物体在视网膜上图像的高,单位为毫米,由图 2.3 的几何形状可以看出 $15/100 = h/17$ 或者 $h = 2.55\text{ mm}$ 。正像 2.1.1 节指出的那样,视网膜图像主要反射在中央凹区域上。然后,由光接收器的相应刺激作用产生感觉。感觉把辐射能转变为电脉冲,最后由大脑解码。

制,如果延伸太远,就会失去意义,因为高得多的强度将会把适应能力提高到比 B_0 更高的数值。

在任何特定的适应级,人眼辨别光强度之间变化的能力也是值得考虑的。用以确定人类视觉系统亮度辨别能力的一个典型实验由一个注视对象和均匀的、大到足以使其占有全部视野的发光区组成。这一区域是典型的漫反射体,例如,不透明玻璃,它被一个强度 I 可变的后光源照射时发光。在这一区域加上一个照射分量 ΔI ,形成一个短期闪烁,该闪烁以均匀光场中央的圆形方式出现,如图 2.5 所示。

如果 ΔI 不够亮,则目标不变,表明没有可察觉的变化。当 ΔI 逐渐加强时,则目标给出一个正的响应,指出一个觉察到的变化。最后, ΔI 足够强,物体将始终给出“肯定”的响应。 $\Delta I_c/I$ 称为韦伯比,这里 ΔI_c 是在背景照明为 I 的情况下可辨别照明增量的 50%。 $\Delta I_c/I$ 值较小意味着可辨别强度较小的百分比变化,这表示亮度辨别能力好。反之, $\Delta I_c/I$ 较大意味着要求有较大百分比的强度变化,这表示亮度辨别能力较差。

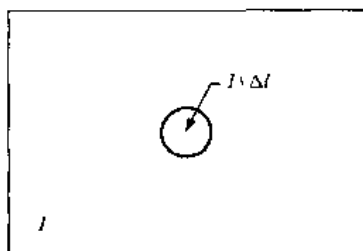


图 2.5 用于描述亮度辨别特性的基本实验

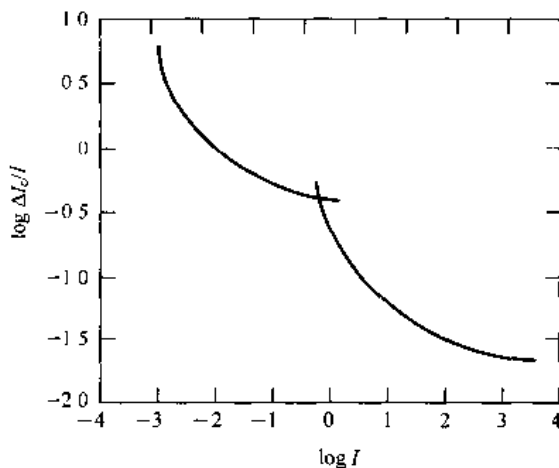


图 2.6 作为强度函数的典型韦伯比

作为 I 的对数函数, $\log \Delta I_c/I$ 曲线有图 2.6 所示的通常形状。这一曲线表明,在低的照明级别,亮度辨别较差(韦伯比大),当背景照明增加时亮度辨别得到有意义的改善(韦伯比降低)。曲线中的两个分支反映了这样的事实,即,在低照明级别情况,视觉由杆状体执行,在高照明级别情况,视觉由锥状体起作用(表示较好的辨别能力)。

如果背景照明保持恒定,并且代替闪光的其他光源的亮度从不能觉察到总可以被觉察间逐渐变化,一般观察者可以辨别总共 12 到 24 级不同强度变化。粗略地看,这个结果与一个人观看一幅单色图像的任一点时能觉察到的不同强度数量有关。这个结果并不意味着一幅图像可以用这样小的强度数值来表现,因为,当眼睛扫视图像时,平均背景在变化,这样,允许在每个新的适应水平上检测不同的增量变化。最后结果是眼睛能够辨别很宽的全部强度范围。事实上,正如 2.4.3 节所示,眼睛可以检测到用不足 24 级的全部强度描述的单色图像中很糟的轮廓效应。

两个现象可以证明感觉亮度不是简单的强度函数。第一个现象基于视觉系统倾向不同强度区域边界周围的“欠调”或“过调”。图 2.7(a)显示了这种现象的一个典型例子。虽然条带强度恒定,但实际感觉到了一幅带有毛边(特别是靠近边界处)的亮度图形[图 2.7(b)]。这些