

附录 A 生物视觉信息处理

- A.1 人类视觉系统概述
 - A.1.1 人类视觉系统的组成
 - A.1.2 眼球的光学系统
 - A.1.3 视网膜
 - A.1.4 视觉通路
- A.2 生物视觉信息处理
 - A.2.1 视觉信息的空间域处理
 - A.2.1.1 感受野
 - A.2.1.2 生物视觉系统中的特征检测
 - A.2.1.3 侧抑制
 - A.2.2 生理频率分析器

A.1 人类视觉系统概述

人的眼睛可以分辨出只有几十个光子的微弱光线；可以判断出垂直线不到 1 度的倾斜，可以引导人们穿过拥挤的路口；还可以认出图画中物体的名称等。总之眼睛具有许多功能，中国人甚至还有“眼见为实”的谚语。当然，这里所说的眼睛事实上是指眼—脑系统。眼—脑系统在完成上述这些视觉功能时涉及不同的视觉信息处理过程。人的视觉处理过程的特点是一个从低到高的分层结构。例如，从一幅图画中认出图中的物体就需要不同层次的信息处理。首先要分辨出表示物体的线条，这涉及低层的视觉信息处理；根据以往的知识 and 经验，经过符号解释识别物体的类别就涉及高层的处理。对人类视觉的研究就是试图分辨这些层次，弄清各个层次所起的作用。为此要进行各种实验研究。在这里我们所感兴趣的是对人类视觉进行的心理物理学（psychophysical）和神经生理学（neurophysiology）实验；以及这些实验结果对计算机视觉研究的影响。为了便于区分这两种实验的研究领域，我们来分析一下眼睛和大脑细胞对输入刺激的响应情况。如图 A.1 所示，生物视觉系统的研究可分成二个层次。第一层是关于单个神经细胞的特性。它研究当受到某种输入信号的刺激时单个细胞的反应模式。这是神经生理学主要的研究内容。一般来说，神经生理学主要研究单个或一小簇神经细胞的行为。这时通常要实验量测神经细胞对输入信号所作的编码输出。其中可能包括输出编码信号的空间位置、作用频率、响应幅度等。当然，这些神

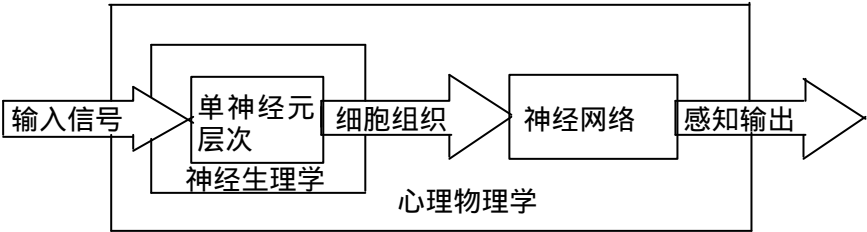


图 A.1 生物视觉系统的研究层次

经细胞是相互联系，共同配合产生输出的，特别在高层的视觉处理中更是这样的。但要研究神经网络中的这些细胞是如何相互影响和作用是非常困难的。神经网络对视觉信息处理的作用生物视觉系统研究中的第二个层次。对这个层次的研究仅仅是建立在发现输入信息与感

知输出之间对应关系的基础上，这就是经典的黑箱实验的方法。这第二个研究层次就是心理物理学研究范围。

我们在这里粗略介绍人类视觉生理的目的是为了向计算机领域的科技人员提供有关背景知识和材料。因此在许多地方为方便起见采用方块图的表示方法。此外,限于篇幅我们着重介绍与马尔的视觉计算理论有关的内容。

A.1.1 人类视觉系统的组成

我们可以把人类视觉系统看成一个有生命的光学变换器和信息处理系统。眼睛就是光学变换器，并能进行部分处理工作。事实上在进化阶段上越是低级的生物，它们的眼睛越担负更多的处理功能。为便于说明可把视觉系统分成三部分（图 A.2）。这三部分都相当复杂，但相比而言，第一部分，光学系统，由于有关的神经活动最少，因此最为简单；第二部分是视网膜。它把光信号转变成电信号，并进行某些细胞一级的处理。第一、第二两部分都在眼睛里。最后一层是视觉通路，它实质上是代表从视网膜到大脑皮层的视觉通路上所完成的复杂处理的统称。

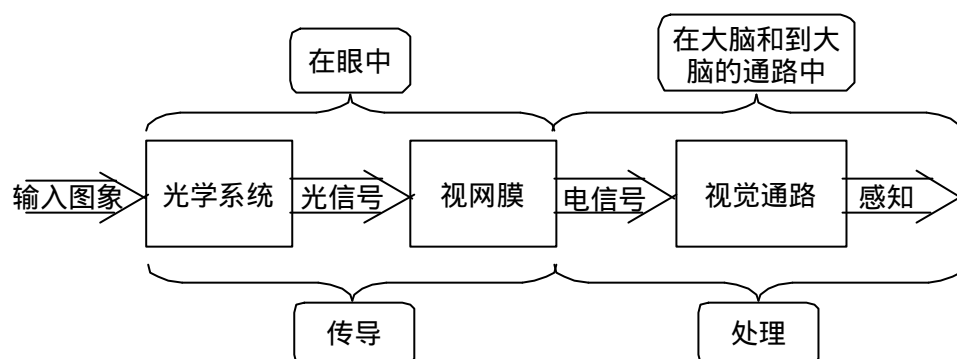


图 A.2 视觉系统的组成

A.1.2 眼球的光学系统

人眼的外形接近球形，是一个直径为 24 毫米的球状体，又称为眼球。眼球壁由巩膜、脉络膜和视网膜组成（图 A.3）。巩膜在眼球壁最外面，它主要起着巩固、保护眼球的作用。巩膜前面有六分之一是透明的，这部分称为角膜。角膜厚度约为 1 毫米，直径为 11 毫米，它好象是眼睛的玻璃窗户。光线由角膜射入眼内。

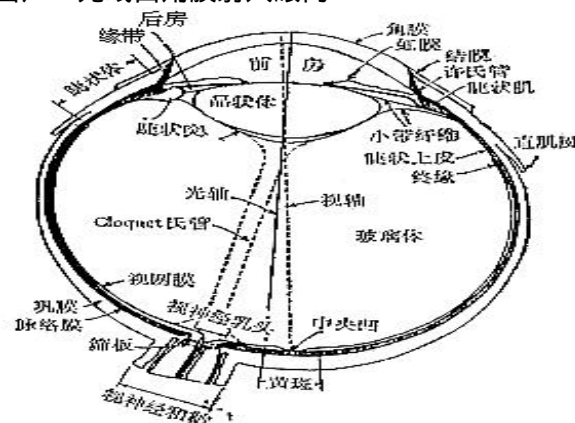


图 A.3 人眼模式图

脉络膜紧贴巩膜，起输送养料、滋养眼睛的作用。脉络膜最前面的环状部分为虹膜。眼的颜色由虹膜中的色素决定。虹膜中央有一个小圆孔，叫做瞳孔。瞳孔能控制进入眼内的光量，它可随光线的强弱而扩大或缩小，起照相机光圈的作用。

虹膜后面为水晶体，它是透明的胶状体，并富有弹性。它将光线聚焦到视网膜上。角膜与虹膜之间的空间为前房，位于虹膜和水晶体之间的空间为后房。这两个房都充满水样液。水晶体后面的空间充满着叫玻璃体的液体。

眼球的第三层是视网膜，约占眼球内表面的 $\frac{2}{3}$ 。它含有感光细胞（杆体细胞和锥体细胞）。从眼睛的构造可知，它的光路由以下几部分组成：角膜、水样液、虹膜、瞳孔、水晶体和玻璃体等。光线通过角膜进入眼球，然后经过水样液到达虹膜。虹膜上的瞳孔随着光线的强度变化它的孔径大小（从 2 毫米到 8 毫米）。强光时缩小、弱光时扩大。光线通过瞳孔后经过水晶体和玻璃体最后到达视网膜。水晶体和玻璃体各有不同的折射率以确何在视网膜上得到清晰的成象。眼睛的感光系统就是视网膜，它如同照相机的底片。

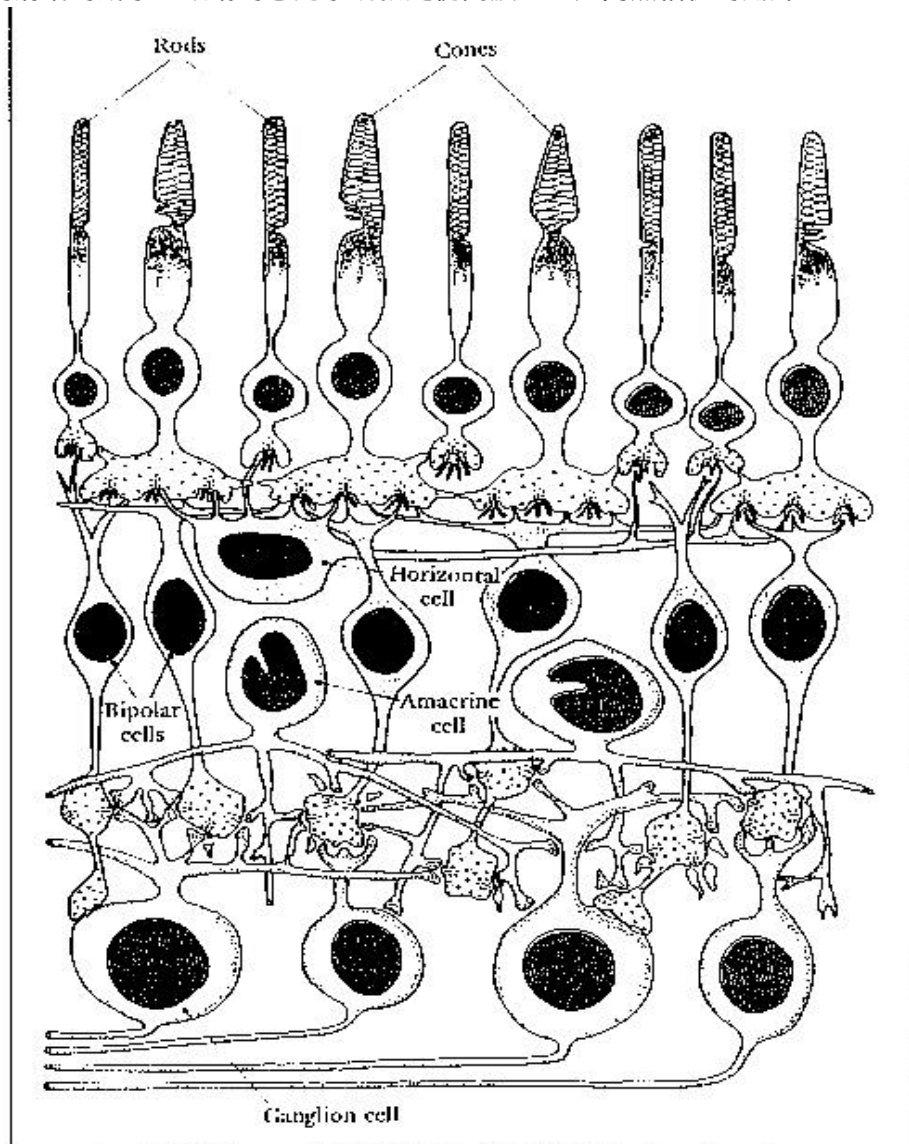


图 A.4 视网膜剖面图

A.1.3 视网膜—光电接收器

视网膜的剖面如图 A.4 所示。它包含感光细胞，双极细胞和神经节细胞。视网膜厚度约为 1-0.5 毫米。从组织学上可分成 10 层。但通常可分成三个层次：(1) 感光细胞，即杆体细胞和锥体细胞。锥体细胞是明视器官，它在光亮条件下发生作用，能分辨细节。杆体细胞是暗视器官对弱光反应灵敏，在低照明情况下发生作用。但它不能感受颜色，对精细物象的辨别也没有什么贡献。(2) 双极细胞。锥体细胞和杆体细胞与双极细胞连接。一般情况是每一个锥体细胞与一个双极细胞连接，这是为了在光亮条件下便于精细地感受外界的刺激。而杆体细胞往往是几十个连接到一个双极细胞。这是为了在黑暗条件下能汇集外界微弱的光刺激。(3) 神经节细胞。其细胞的视觉纤维通向大脑，总共有 80 万个。

在人的视网膜上正对着瞳孔的中央有一个直径为 2.0 毫米的黄色区域，叫黄斑。在黄斑中间有一个小凹，直径为 0.4 毫米，这是视觉最敏锐的地方。视网膜上总共有一亿二十四万个杆体细胞和 700 多万个锥体细胞，主要集中在中央凹附近。在以中央凹为中心大约 3 度视角范围内只有锥体细胞，几乎不存在杆体细胞。在黄斑以外，杆体细胞数量增多，而锥体细胞数量减少。在距中央凹 4 毫米的鼻侧处是视神经进入眼球内的地方，此处既没有杆体细胞，也没有锥体细胞。因此，视网膜上这一点是没有光感受的，叫做盲点。

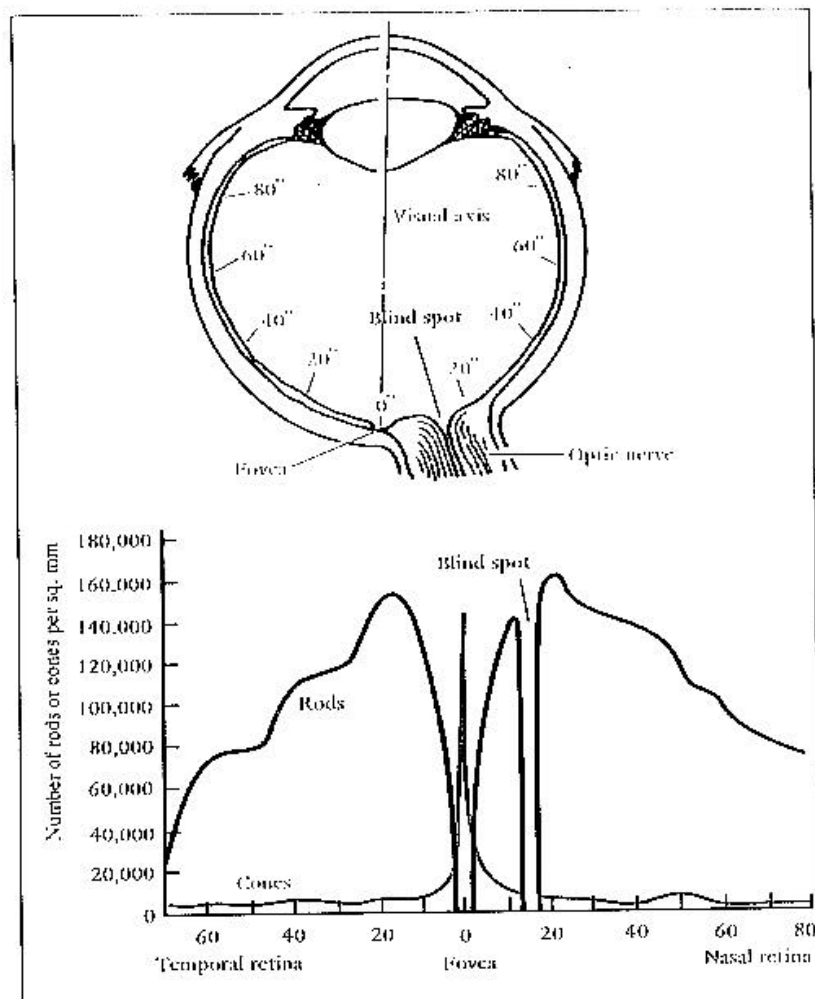


图 A.5 锥体细胞和杆体细胞的分布

A.1.4 视觉通路

光线通过眼球的光学系统到达视网膜，视网膜上的感光细胞完成光电信号的转换，其中的双极细胞和神经节细胞已涉及某些低层次的处理。这一节将介绍在此以后主要的视觉信息传导通路。在传导过程中神经细胞对视觉信息进行了不同层次的处理。进行信息处理并且和其它细胞相互联系的神经细胞称为神经元。

神经元有各种形状，在大脑和小脑内密度为数万 / 毫米³。其基本形状为从细胞体发出的突起。其中有一根细长的称为“轴突”或神经纤维，其它多数比较粗短的突起称为“树突”。轴突是把细胞体的兴奋传给其它神经元的通路。它的前部有分枝，而末梢与其它神经元的树突或细胞体相接触，此接触点称为“突触”。

神经元外面包有细胞膜。通常细胞膜内保持比细胞膜外负 70 毫伏的静息电位。但当细胞兴奋时它就放出振幅为 100 毫伏，持续时间不到 1 毫秒的脉冲电位。此脉冲电位可沿轴突传送。

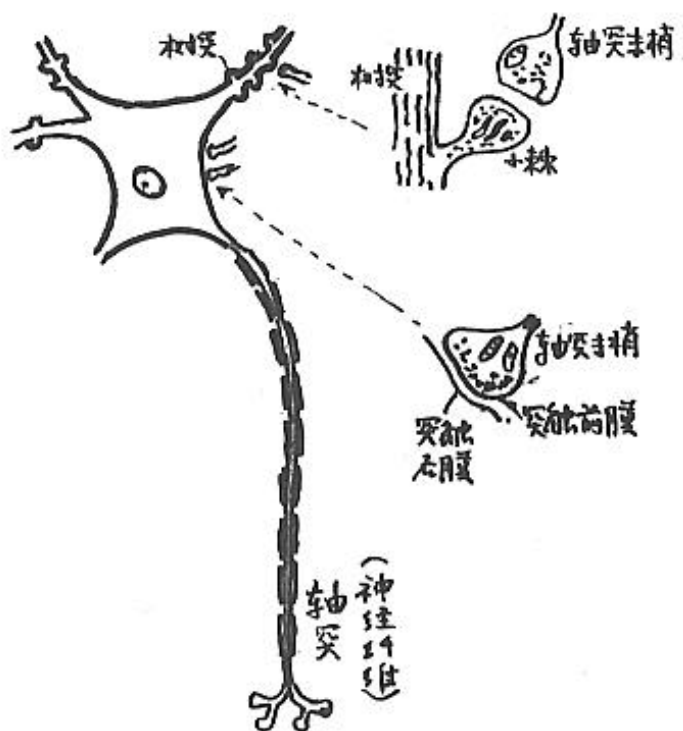


图 A.6 神经元的结构

当给神经元强刺激时产生脉冲的频率增加，而脉冲的形状和振幅大体恒定。

轴突与其他神经元细胞体或树突相接触处有 15~50 纳米的间隙，因此两者在电学上是相互断开的。当脉冲到达轴突的末梢时就向突触间隙释放乙酰胆碱一类的化学物质。由于这种化学物质的作用，突触后细胞膜的离子通透性发生变化。因此就产生正的或负的电位。这种突触后产生的电压称为“突触后电位”。

视觉通路的传导从视网膜上神经节细胞层的一级神经元开始。一级神经元的轴突形成视神经即“视束”。视束的神经纤维分成三个子束。一束来自外侧（颞侧）的半个视网膜；另一束来自内侧（鼻侧）的半个视网膜；第三束来自视网膜的中央部分。人的视束纤维在其往后的过程中有一部分发生交叉——即来自每一视网膜鼻半侧的纤维在视交叉处交叉，而来自视网膜颞侧部分的神经纤维不交叉（图 A.7）。交叉的纤维与另一颞半侧不交叉的纤维合并后

A.2.1 视觉信息的空间域处理

A.2.1.1 感受野 (receptive field)

在计算机视觉系统中图象需要经过采样、量化、编码等步骤然后送入下一级作进一步处理。那么这在人类视觉系统中是如何进行这些处理的呢？物体在眼球中成象以后，在细胞层次上对信号作处理的是神经节细胞。它所完成的处理与视网膜上的感光细胞在空间上是如何以所谓“感受野”形式组织起来有关。感受野是指当视网膜上某一特定区域受到光刺激时，引起视觉通路较高层次上单一神经纤维或单一神经细胞的电反应，这个区域便是该神经纤维或细胞的感受野。因此，在视觉通路不同层次上的单个细胞都有一定的感受野。这里我们首先观察出现在形成视束的神经节细胞上的信号，以便研究输入图象在空间是如何被采样的。更高层次上的细胞的感受野有复杂的几何形状，这便于识别输入图象中特定的图案和特征。

在探测细胞的感受野时可把微电极插入某一神经节细胞，并用小光点作为刺激来探索和扫描视网膜，则可以见到在某一区域内给光或撤光可引起这个神经节细胞脉冲发放的增强或减弱。这个区域就叫做神经节细胞的感受野。对青蛙的感受野的研究发现，大多数感受野呈圆形，按不同功能可分为三种。如果在给光（或光线增强）时，引起神经节细胞脉冲发放频率增加，则这种反应称为给光反应（on 反应），在感受野图以“+”号表示；如果相反，给光时无反应，而撤消时引起脉冲发放频率增加，并在撤光以后不保持脉冲发放，则这种反应叫撤光反应（off 反应），用“-”号表示；另外还有一种当给光与撤光时都能引起发放频率增加，则称为给一撤光反应（on-off 反应），用“±”号表示。所以，给光反应的感受野可以检测照到视网膜上的光线的分布，而撤光反应和给光一撤光反应的感受野则只敏感光线的变化。

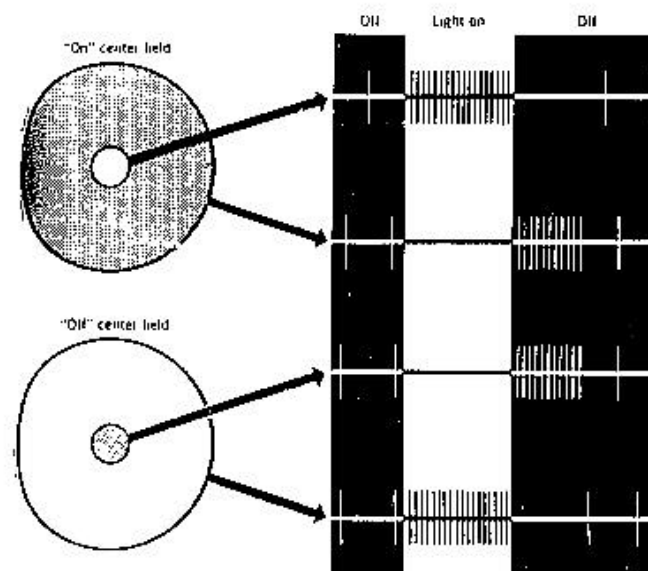


图 A 8 猫的视神经节感受野

对哺乳类动物的感受野的研究首先从猫开始。Kuffler^[Ku 53]发现猫的视神经节的感受野虽然外形也是圆形，但有更复杂的几何结构。它由功能上相互颞颥的两部分，即中心部分和周边部分组成。有两种感受野：中心部分呈给光反应，而周边部分呈撤光反应的称为给光中心感受野；中心部分呈撤光反应，而周边部分呈给光反应的称为撤光中心感受野（图 A.8）。图中右半部分定性地表示了撤光—给光—撤光过程中各部分的响应特性。Rodieck^[Rod 65]

对猫的感受野中各处的响应特性的幅度作了定量的实验研究,发现感受野中各处的灵敏度特性的三维轮廓类似于墨西哥草帽。这个实验结果为第二章中叙述的,马尔以 $\nabla^2 G$ 作为最优滤波器的概念提供了神经生理学的依据。

感受野不仅映射到神经节细胞的输出,而且映射到外侧膝状体和视觉皮层细胞。Hammond^[Ham 73]提出了一个简化的感受野分层模型。视觉皮层细胞感受野的组织结构更为灵活,具有更强的特征检测能力。

如前所述视网膜上的感光细胞数量要比视束中的神经纤维多两个数量级。所以,通过感受野既对输入信号进行了采样,又在空间组织上作了紧缩。

A.2.1.2 生物视觉系统中的特征检测

Lettvin^[Let 59]在题为“青蛙的眼睛告诉青蛙的大脑什么”的论文中提出了一个令人感兴趣的观点,即认为在青蛙的视网膜中实际上包含一个可检测图案的特征检测器。这就启发人们提出了人和动物的视觉系统是把算法硬化了的计算处理器的假设。在青蛙的视觉系统中生物处理器检测输入图象中的边缘和由边缘组成的特征。这意味着在更高层的信息处理中是对这些特征、而不是对原始数据进行分析。

目前认为存在两类视觉系统。第一类系统在视网膜上就有完成低层处理的神经节细胞。青蛙、兔、麻雀的视觉系统就是这种类型。这些动物具有敏感边缘、方向、运动方向等特征的能力;第二类是较为高等的动物,如猫、猴子和人类的视觉系统。在这类系统中神经节被认为只检测颜色和对比度。值得注意的是有相当充分的神经生理学方面的证据说明猫和猴子是在脑皮层完成边缘特征计算的。并且,有证据表明这样的计算是分层进行的。因此,从本质上看,区分这两类视觉系统的基础是看是否具有高度发展的大脑皮层。当然,我们最感兴趣的是在人的大脑皮层中发生的情况,但在目前的技术水平下无法在人体上进行电生理实验。我们认为猴子的视觉系统特性与人类的非常相象。在这一节中我们将着重叙述第二类视觉系统,这一类系统的特点是在大脑皮层中完成复杂的特征分析。Hubel 和 Wiesel^[Hub 63, 68]以猫和猴子为对象所进行的开创性研究使他们获得了诺贝尔奖。他们发现猫和猴子的大脑皮层视区中的神经元根据它们的感受野特性可分成简单型、复杂型和超复杂型等细胞类型。

1. 简单型细胞

图 A.9 中所示为各种简单型细胞的感受野。图中“+”表示光刺激这个位置时引起兴奋,细胞的输出脉冲频率增加;“-”表示光刺激这个位置时引起抑制,细胞的输出脉冲频率降低。光同时刺激这两个区域时,则两种效应相互抵消。对与兴奋区大小完全相同的刺激图案反应最强。简单型细胞敏感的特点可概括成以下几种:(1)检测在特定位置、特定方位(最适方位)的亮直线。(2)检测在特定方位的暗直线。(3)检测特定方位的边缘。

感受野的最适方位对每个细胞是固有的。移动光刺激图案时,一般可以观察到比给、撤静止图案时有更强的反应。除了图案的形状和方位,而且运动方向也起重要作用。一般沿与最适方位垂直的方向运动时输出最大。

图 A.9 中所示的各种感受野是如何形成的呢?一种可能的模型如图 A.10 所示。图 A.10 表示亮线检测器可由神经节或外侧膝状体中的给光中心型神经元通过突触联系而构成。

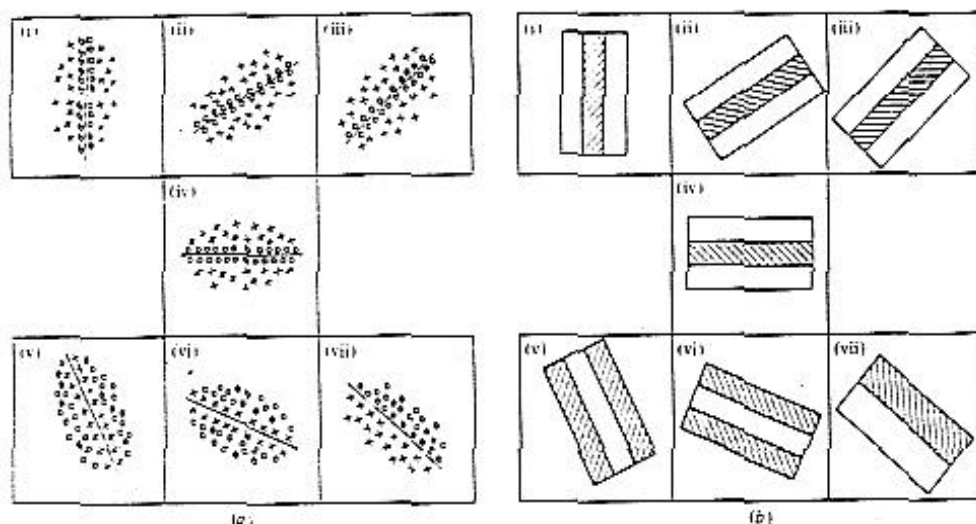


图 A.9 各种简单型细胞感受野

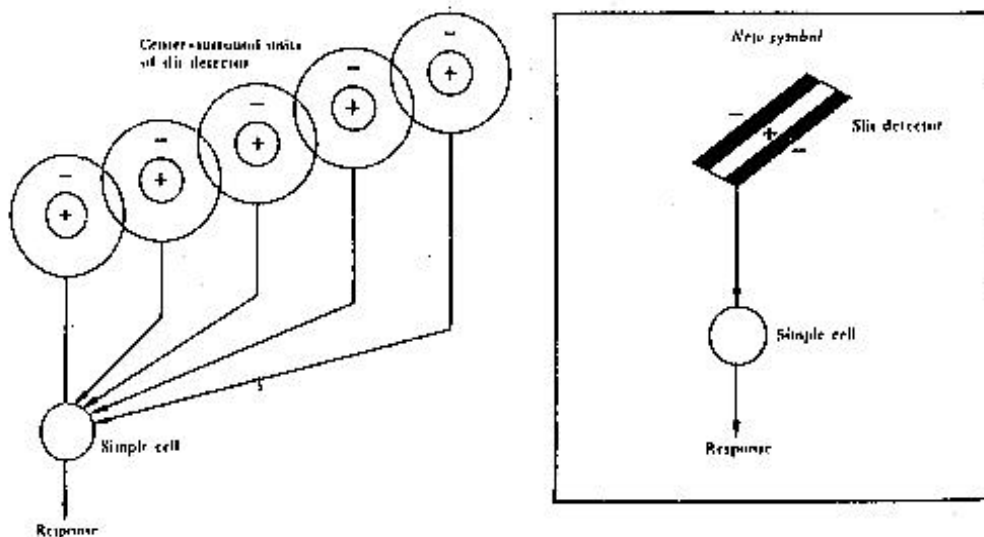


图 A.10 简单型细胞突触关系的模型

2. 复杂型细胞

复杂型细胞仍对刺激图案中的直线和边缘的方位以及运动方向很敏感，但与简单型细胞不同，对它们的位置不敏感。图 A.11 表示当条形图案沿最适方向垂直移过复杂细胞感受野时，在 A、B、C 位置都有很强的输出，而如果水平移过 D 时则由于不在最适方向上移动，没有输出。如果是简单细胞感受野就只在 B 位置有强的输出时神经元才有强烈反应，而对其它方向的边缘则无反应。(b)表示只要边缘在感受野之内，则神经元的反应与边缘的位置无关。图 A.12 表示复杂型细胞可能如何由简单型细胞和神经节细胞的感受野构成的。

3. 超复杂型细胞

迄今为止，在大脑视区的神经细胞中发现的最高层次是超复杂型细胞。它又可分成低级和高级两种。

(1) 低级超复杂型细胞。这种细胞可敏感直线和边缘的方向和运动，并且作为刺激的直线的长度和边缘的宽度都有最适值。如图 A.13 所示，比最适长度更长的直线或比最适宽度

更宽的边缘，如同运动方向不在最适方向上一样都会使其反应受到抑制。

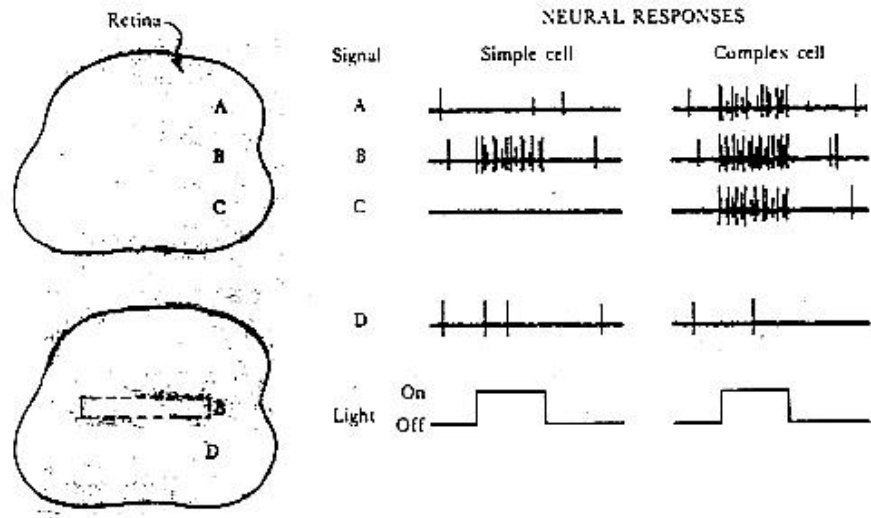


图 A.11 复杂型细胞的感受野

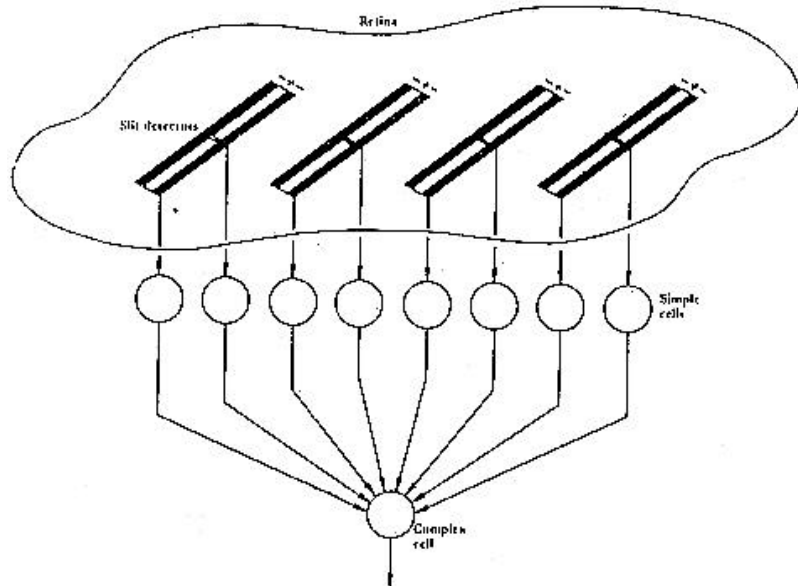


图 A.12 复杂型细胞的突触联系模式

(2) 高级超复杂型细胞。它可以检测边缘角的运动。如图 A.14 所示，当 90 度的角从右向左运动时产生最大的反应。如同在较低层次上看到的那样，人们曾经认为超复杂细胞可由一组复杂细胞来构成。但这样的模型已被最近的实验结果所否定。目前我们还不清楚上述特征检测器的细节，以及它们内部是如何连接的，但有一点可以肯定的是在猫的视觉系统中存在某种形式的特征检测器，并且起着重要作用。我们假设在人的视觉系统中也存在着相似的机理。

A.2.1.3 侧抑制 (lateral inhibition)

前面我们研究了视网膜细胞如何组织成感受野，以及这些感受野如何构成一个分层的结构以便检测直线、边缘、甚至角的特征。到目前为止我们研究的是各个层次上单个细胞与视网膜细胞之间的空间组织。因此还需要研究同一层次上各个神经元细胞之间的相互作用。同一层次上的各个神经元之间通过紧密的联系完成对信息的处理。这些处理可分成局部的和全

局的两种。局部的处理涉及以对边缘和图象的增强处理，全局的处理涉及视觉中的主观轮廓、光错觉等现象。限于篇幅这一节只讨论局部处理问题，这就是侧抑制现象。

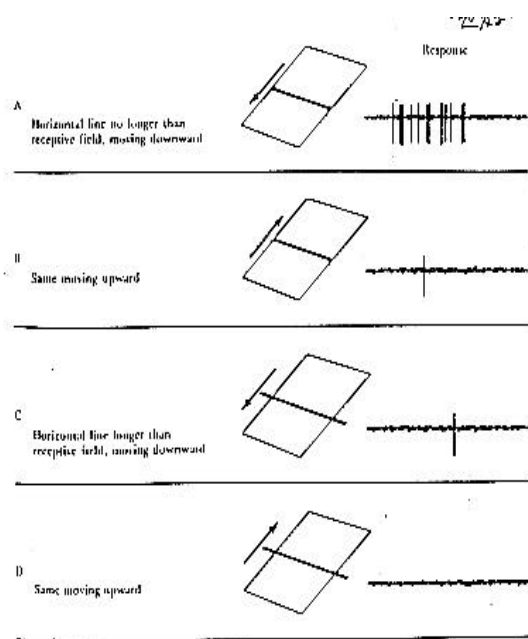


图 A.13 低级超复杂型细胞的感受野

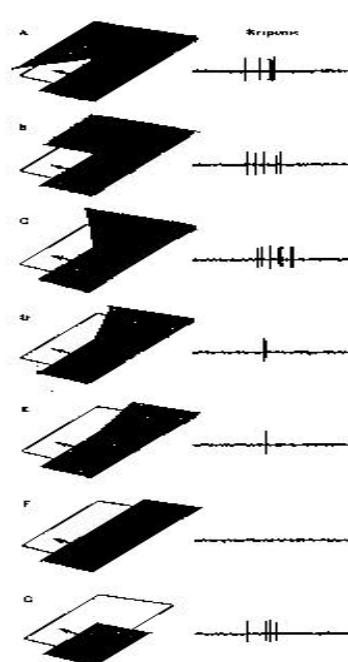


图 A.14 高级超复杂型细胞的感受野

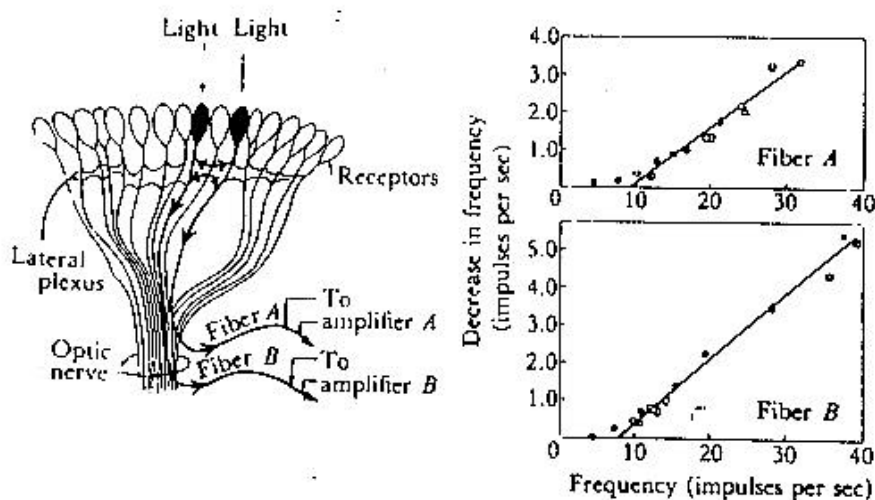


图 A.15 苍蝇的侧抑制

侧抑制就是邻近的神经元彼此互相抑制对方的反应。这是生物感觉神经系统中到处可见的基本机能之一，它不但存在于视觉之中，而且存在于听觉、触觉、温度等各种感觉系统中。

Hardilne^[Har 57]用萤的复眼作了侧抑制机制的著名实验。在萤的 1000 多个小眼之间存在相互抑制对方反应的作用。如图 A.15 所示，通过插入两个小眼的神经纤维的电极可监测神经元输出的电脉冲信号。图上 A、B 两个小眼或被同时光照或被同时不照。图中右方的图表说明一个小眼对另一小眼的抑制作用。它的纵坐标说明当 A、B 两个小眼同时被光照时，给定神经元的输出脉冲频率随另一个神经元的输出脉冲频率增加而减小的比例。例如，右上方的图表示，当神经元 B 的输出脉冲频率为 30 次/秒时，神经元 A 的输出频率降低了 3 次/秒。

侧抑制机制可对图象进行增强处理，这就可以消除自然照明的影响。图 A.16 上所示实验证明鱼的复眼具有图象增强能力。开始时先把整个复眼罩起来，只露出一只小眼（标有⊗记号）。当一幅边缘图案从左向右移过这只小眼时，没有侧抑制。所以，图 A.16 上所示的该小眼的神经元响应曲线与输入图案相同。然后打开复眼上的罩子，重复实验。结果得到下方的曲线。这相当于如果输入图案是静止时，⊗小眼周围小眼的响应在空间分布的曲线。这样输入的边缘由于侧抑制机制被增强了。

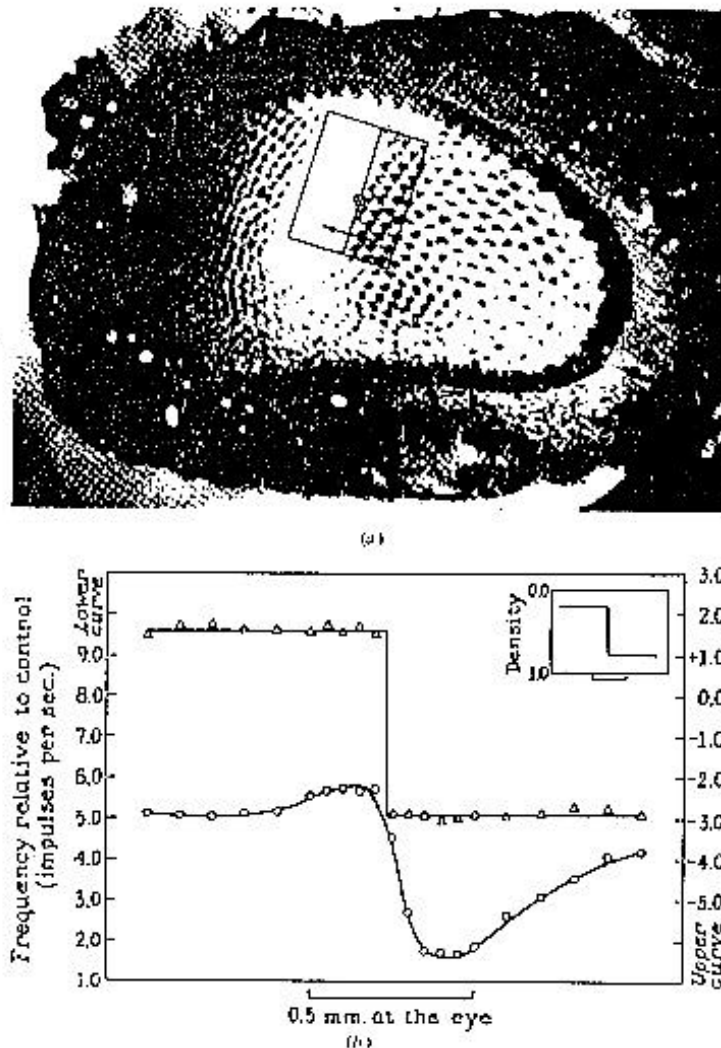


图 A.16 鱼眼的抑制实验

在人的视觉系统中也存在着相似的侧抑制现象，不过存在于更高的层次上。March 在 1865 年发现的“马赫带”就是一个实验证明。他发现当人观察一幅由黑和白区域组成的边缘图象时，人会感觉到图案中的黑白区交界处存在着光亮和暗黑的带，感觉中的亮度分布曲线如图 A.17 中下方曲线所示。这些带就叫马赫带^[Ratliff 72]。

A.2.2 生理频谱分析

视觉系统刚能分辨的空间或时间上分离的视觉信号的度量称为系统的分辨力。分辨力可用视锐度（Visual acuity）和对比灵敏度（Contrast Sensitivity）来研究。前者是系统可分辨的空间图案的量测，后者是为了分辨出交替排列的黑、白条纹那样的图案所需要的最小对比度。这两种量测都是把人类视觉系统看成是“黑箱处理器”。它的输入是给观察者看的光刺

激图案，输出是知觉（perceptual）反应。从本质上讲这两种量测是相互补充的。视锐度是在空间域里定义的，而对比灵敏度是在频率域里定义的。对人类视觉系统对比灵敏度的实验研究引伸出生理频谱分析器的假设。这是这一节要讨论的内容。所以，这里我们不讨论视锐度，而集中研究对比灵敏度。

考察人类视觉系统的对比灵敏度时把视觉系统作为一个黑箱来研究。它的输入是栅条图案，输出是特定的心理物理测量。如果我们假设这个黑箱是一个线性系统，那么就可以考察它在频率域里的特性。

输入的栅条图案如图 A.18 所示。图中亮度沿水平方向分布是正弦函数。这样的图案虽然看起来是二维的，但实质是一维的。频率的单位是单位视角所面对的周期数。图案对比度是以亮度的最大差值与亮度的平均值之比 C 来测量：

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别是图案中最大和最小亮度。对绝对均匀的光照区域来说 $I_{\max} = I_{\min}$ ，所以 $C=0$ 。如果栅条是尽可能地黑时， $I_{\min} = 0$ ，则 $C=1$ 。对比度 C 的值在 0 与 1 之间。

栅条图案的空间频率和对比度对视觉辨认都有密切关系。高频率栅条需要高对比度才能被察觉；低频率栅条在对比度较低时就能被察觉。在一定的空间频率下刚刚能辨认出栅条存在时所需的最低对比度称为对比阈值 $C_q(u)$ ，（Contrast threshold）其中 u 表示栅条的频率。这个值的倒数代表观察者对栅条图案的对比灵敏度。人类视觉系统的对比灵敏度随频率变化的函数称为对比灵敏度函数 $CSF(u)$ （Contrast Sensitivity Function）。函数形状如图 A.18 所示。

作空间频率的 Fourier 分析是检验光学系统质量的有效工具。我们可以用 Fourier 分析方法来描述透镜镜片的质量。将一个正弦波栅条图案通过镜片成象在另一侧的表面上，再检查图象的亮度分布。这时图象表面的亮度分布仍然是正弦波栅条，但对比度降低了。通过镜片以后的栅条图案的对比度与原来栅条图案的对比度之比称为调制率（modulation）。调制率随频率变化的函数称为镜片的调制传递函数，用 $H(u)$ 表示

$$H(u) = \frac{C_{out}}{C_{in}}$$

其中 C_{in} 和 C_{out} 分别是输入和输出图案的对比度， u 是空间频率。

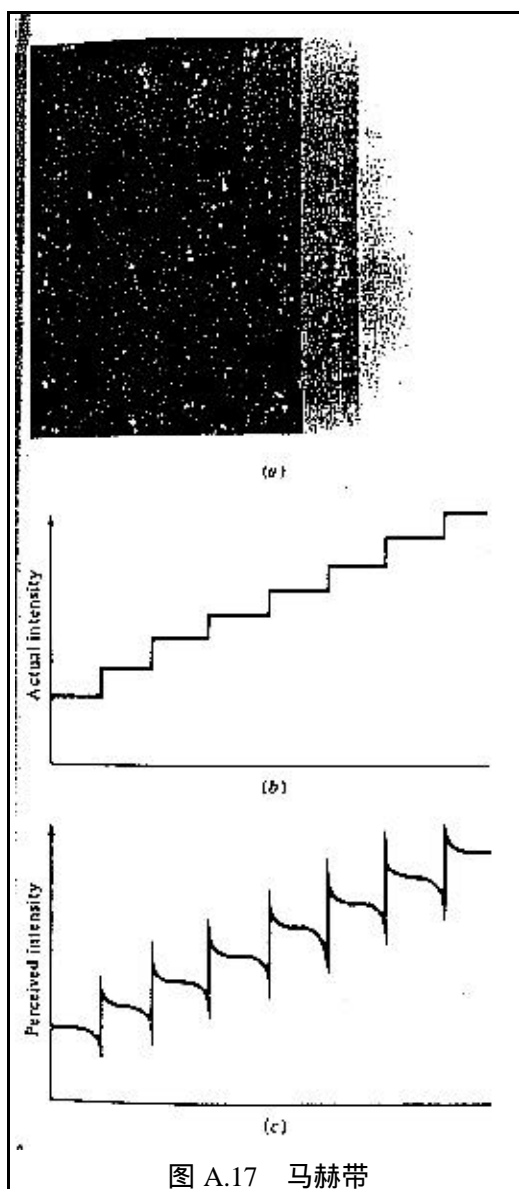


图 A.17 马赫带

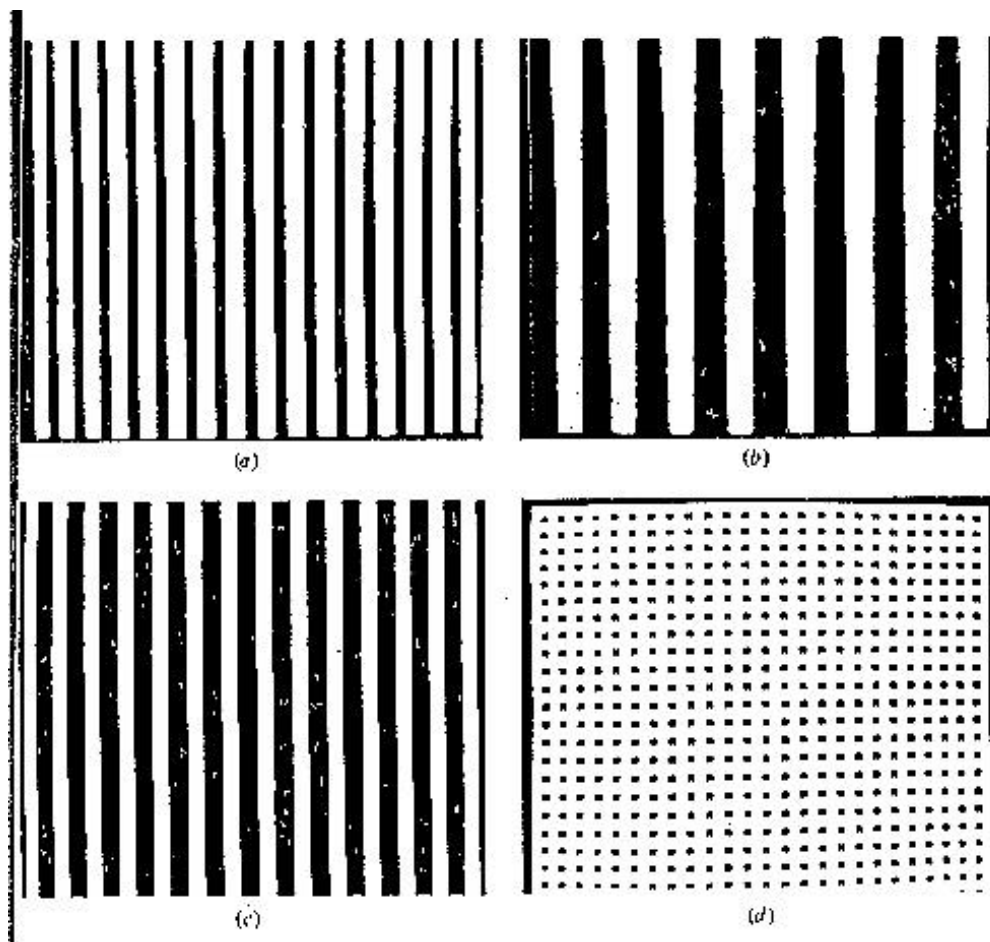


图 A.18 正弦波和方波栅条图案

如果把人类视觉系统作为一个黑箱系统，并假设是一个线性系统，那么也可用类似于对光学系统作 Fourier 分析的方法研究它的调制传递函数。这时它代表人的视觉系统对不同空间频率正弦波的分辨能力，而这种分辨能力是用对比灵敏度来测量的^[Campbell 65]。

$$H(u) \equiv CSF(u) = \frac{1}{C_q(u)}$$

测量人眼 $H(u)$ 的常用方法是阈限法，即测量对比灵敏度的方法。具体方法是被试者观察一个一定空间频率的栅条图案，要求他调整栅条的对比度，直到刚能察觉出栅条存在，这时即达到了对比阈限 $C_q(u)$ 。图 A.20 是用对比阈限表示的视觉调制传递函数，这是一个带通滤波器。最佳频率是在 2~5 周/度之间。

Compbell 和 Robson^[Com 78]应用包含不同频率正弦波分量的栅条图案对对比灵敏度函数的实验测量。实验中他们采用了方波状的栅条图案，并与正弦波的栅条图案的实验结果作了对比。他们的实验结果如图 A.20 所示。他们发现，在大约 1 周/度频率以下时，人对正弦波和方波图案的 CSF 很相似，并且两者的比值约为 $4/\pi$ 。因此，Compbell 和 Robson 提出了以下两点假设：

1. 人的视觉系统中存在着多个相互独立的通道。这就是说，特定的频率分量只有当它在某一通道中的响应超过阈值时才能被检测出来。
2. 这些通道是窄带的，并且相互独立。

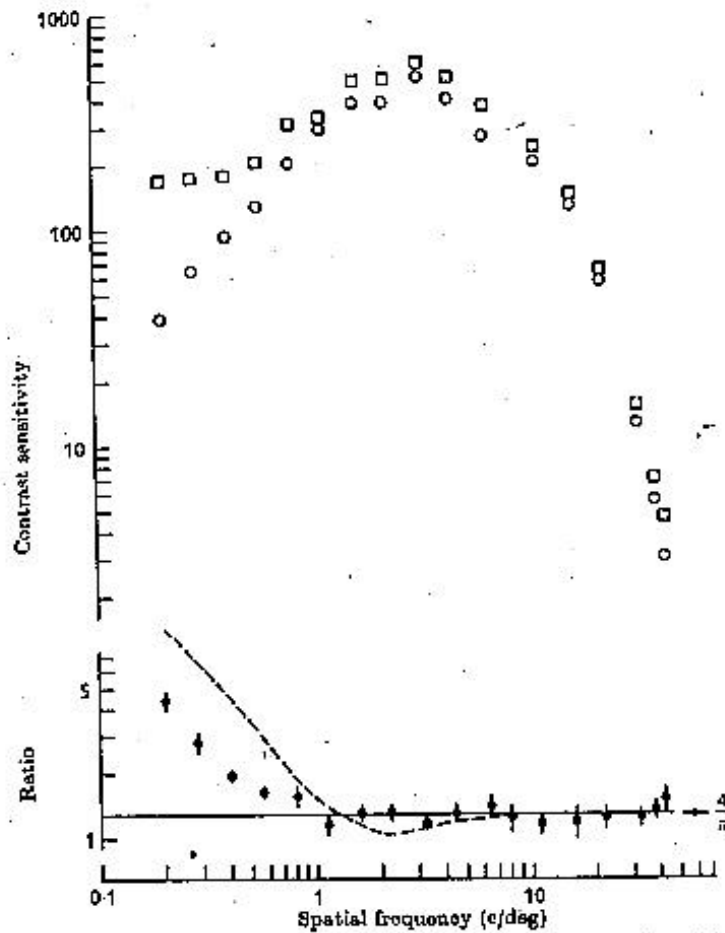


图 A.19 人对正弦波和方波栅条图案的对比灵敏度函数

这两点假设与实验结果是一致的。因为，在方波中包含基波和奇次谐波。某一频率分量只有当超过相应通道的阈值时才能被检测出来。而谐波的对比度低于阈值，所以方波栅条图案的对比灵敏度只取决于输入信号中的基波。同时，方波所含基波的幅度与它本身幅度之比为 $4/\pi$ ，所以，方波图案与正弦波图案的 CSF 之比约为 $4/\pi$ 。

在以其它的带有偶次谐波波形的栅条图案进行的实验中也得到了与上述实验相似的结果。但其它一些实验结果^[Georgeson 75]在进一步支持多通道假设的同时，也在通道的频带宽度上得出不同结论，认为通道不是窄带的，而应该较宽一些。其带宽约为 1 倍频程 (octave)。根据上述假设，已经提出了两种等价的多通道模型：概率相加模型和矢量幅度模型。详见^[Martin 85]中的第六章。

参考文献

- [荆其诚 87] 荆其诚等，人类的视觉，科学出版社，1987。
- [福岛邦彦 80] 福岛邦彦，视觉生理与仿生学，科学出版社 1980。
- [陈霖 86] 陈霖，拓扑性质检测，关于思维科学，钱学森主编，上海人民出版社，250-301，1986。
- [Bab 83] Babaud, J., Witkin, A., and Duda, R., Uniqueness of the Gaussian Kernel for scale-space filtering, Fairchild Tech. Rep. 645, Flair 22, 1983.

- [Bara 81] Barrow, H. G., and Tenenbaum, J.M., Computational Vision, Proceedings of IEEE, Vol.69, No.5, 1981.
- [Bar 78] Barrow, H.G., and Terenbaum, J.M., Recovering Scene Characteristics from images, In A.R.Hanson and E.M. Riseman [Eds], Computer Vision Systems. New York, Academic Press, 3-26, 1978.
- [Bra 65] Bracewell, R., The Fourier Transform and its applications, New York, MacGraw-Hill, 1965.
- [Cam 68] Campbell, F.W.C. and Robson, J., Application of Fourier analysis to the Visibility of gratings, J. Physiol, (Lond) 197, 551-566, 1968.
- [Feb 85] Feldman, J.A. and Ballard, D.H., Computing With Connections, In J. Beck, B. Hope and A. Resenfeld, (eds), Human and Machine Vision, Academic Press, 107, 1983.
- [Fel 85] Feldman, J.A., Four Frames Suffice; A Provisional Model of Vision and Space, behavioural and Brain Sciences 8, 1985, 265-284.
- [Har 84] Haralick, M., Digital step edges from zerocrossing of second directional derivative, IEEE trans. Pattern, Anal. Mach. Intell. PAMI-6, 1984, 58-68.
- [Hoc 81] Hochberg, s., Levels of Perceptual Organization, in M. Kubovg and J.R. Pomer antz (eds), Perceptual Organiztion, 255, 1981.
- [Hub, Wie 62] Hubel, D.H, and Wiesel, T.N., Receptive fields, Binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex, J. physiol (Lond)166, 106-154, 1962.
- [Hub 68] Hubel, D.H., and wiesel, T.N., Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex., J., physiol. (Lond) 195, 215-243.
- [Huf 77] Huffman, D.A., Realizable Configurations of lines in pictures of polyhedra, in E.W.Elcock and D.Michie eds., Machine Intelligence 8, Edinbough: Edinbargh UniVersity Press, 493-509, 1977.
- [Kan 87] Kanal, L. and Tsao. T., Artificial Intelligence and Natural Perception, In Intelligent Autonomous Systems, P60-70, 1987.
- [Mar 80] Marr, D. and Hildreth, E., Theory of edge detection, Proc. R. Soc. Lond. B207, 187-217, 1980.
- [Mar 85] Martin, D. L., Vision in Man and Machine, McGraw-Hill 1985.
- [May 81] Mayhew, J.E.W. and Frisby, J.P., Psycho physical and computational Studies towards a theory of human stereopsis, Artificial Intelligence 17 349-386, 1981.
- [New 79] Newell, A and Simon, H.A., Human Problem Solving, Englewood, Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1972.
- [Pen 86] Pentlan, A.P., Part Models, In Proc. of Int. Conf. Pattern Recognition and Computer Vision, Miami Beach, Porida, June 22-26, 1986, 242-249.
- [Rob 65] Roberts, L., Machine perception of three dimensional solids, in J. Tippetl eds, Optical and electron optical information Processing. Cambri dge. Mass., MIT Press, 159-197, 1965.
- [Swa 91] Swain, M.J., and Stricker, M., eds., Promising Directions in Active Vision. The NSF Active Vision workshop, University of Chicago, Aug, 5-7, 1991.
- [Tez 82] Tezopouls, D., Multilevel reconstruction of visual surfaces, M.I.T, Artif. Intell. Lab., A.I, Mamo. 671, 1982.
- [Wal 72] Waltz, D., Understanding line drawings of scene with shadow, in the psychology of Computer Visio, ed. by. P.H.Winston, McGraw-Hill Book Company, N.Y.1975, Based on ph.D. Thesis; MIT, MA, 1972.
- [Tez 82] Tezopoulos, D., Multilevel reconstruction of Visual surfaces, M.I.T. Artif. Intell. Lab.,

A.I. Mamo. 671, 1982.

[Wit 83] Witkin, A.p., Scale-space filtering, proc. of the 8 th Int. Conf. On AI. 1019-1022, 1983.

[Yui 86] Yuille, A.I., and Poggio, T.A., Scaling theorems for zero crossings. IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8, No.1, 15-25, 1986.