

用广义 Gabor 函数的感受野模型描述的马赫带*

傅玉川 王植恒 万海峰

(四川大学物理系, 成都 610064)

关键词 马赫带, 感受野, 视觉信息处理

马赫带效应是一种广为人知的视错觉现象, 它为主观的明度感觉即视亮度与被视物体表面光亮度之间并不是成简单的比例关系提供了一个基本的证明. 它反映出人眼具有反差(对比度)增强的特性, 这种边缘增强的高通滤波性质使人眼能自动地突出光亮度变化景物的边缘信息, 而对均匀的或缓慢变化的环境背景产生抑制.

自 E. Mach 1865 年说明马赫带效应以来, 先后有许多人对这种视错觉的现象和机理进行了各方面的研究, 各种各样的数学模型也陆续发表^[1]. 对马赫带效应机理的研究, 不仅是为了解释马赫带现象本身, 而在于更深入地理解所有视知觉现象产生的神经机制以及视觉系统进行信息处理的方式和特征. 本文利用汪云九等人提出的广义 Gabor 函数的感受野模型对马赫带效应进行了数学分析^[2,3], 借此希望能进一步完善马赫带的数学模型和机理研究.

1 感受野的 Gabor 函数模型

自 1938 年 Hartling 第一次在视觉研究中引入感受野的概念以来, 电生理学实验已发现了许多感受野类型, 同时理论上也提出了多个模型用以描述各种各样的感受野类型^[4,5]. 但迄今为止, 还没有一个模型试图对所有感受野类型作统一的理论描述. 近年来, 汪云九等人把广义 Gabor 函数(简记为 EG)作为视觉系统的初级信息加工部分的权函数, 较好地描述了视觉系统不同层次上一些主要类型感受野的性质, 为感受野的统一描述上的初步尝试.

所谓 EG 函数, 就是把原始 Gabor 函数中的空间变量从一维推广到二维, 再加上时间变量, 同时引入若干个有生理意义的参数. 他们模型中的 EG 函数是由一族函数组成的. 这里只列出第一类 EG 函数, 它可以描述视网膜和侧膝体上的同心圆结构的感受野, 其表达式为:

$$EG(r, t) = A \cos[2\pi(f_r r + f_t t) + \theta] \\ \times \exp[-r^2/\sigma_r^2 - (t - \tau)^2/\sigma_t^2],$$

其中 r 和 t 分别代表空间极坐标和时间变量, 函数中各参数的物理意义如下: A ——振幅, f_t ——时间频率, θ ——初始位相, σ_r^2 ——空间方差, σ_t^2 ——时间方差, τ ——时间延迟.

把脊椎动物视觉系统中进行初级信息加工的部分作为一个并行的图形处理系统, 其特性可以用该系统的权函数来描述. 从神经生物学来说, 权函数就代表接收端(输入端)与记录端(输出端)之间神经网络的联系方式. EG 的各参数的取值是描述这一信息处理系统性质的关键.

2 马赫带的数学模拟

因为马赫带刺激图形的亮度分布是沿着同一个方向增加或减少, 所以对它的模拟也只需一维的 Gabor 权函数. 这里必须引入几点近似: a. 就局部小区域而言, 可把视觉系统看作一个齐次线性系统; b. 本文讨论的是静止图形刺激引起的响应, 可以不考虑时间因子的影响. 所以权函数表示为: $K(x) = A \cos(2\pi f_x x + \theta) \exp(-x^2/\sigma_x^2)$, 系统的输出函数为: $U(\xi) = \int K(\xi - x) I(x) dx$, 而输入函数为渐变的斜坡形函数. 由图 1 的结果可以看出, 马赫带刺激图形经过这样一个系统的处理后, 的确产生了马赫带效应.

关于马赫带的心理学实验结果表明, 输入刺激的亮度斜率(即坡度)越大, 马赫带效应越明显, 图 2 正是这一结果的直观表示. 我们通过对不同斜率的输入图形的模拟, 也得到了同样的结果, 它们的输出响应如图 3 所示.

前面曾经提到过, 权函数的参量的取值是描述一个信息处理系统性质的关键. 事实上, 我们在模拟过程中已发现, 系统的输出很敏感地依赖于参量的改变, 当 $A=15.12$, $f_x=2.4$ 周/度, $\sigma_x=0.16$ 度, $\theta=0$ 时, 能较好地描述马赫带效应.

* 国家自然科学基金资助项目.

收稿日期: 1992-08-07 修回日期: 1992-09-11

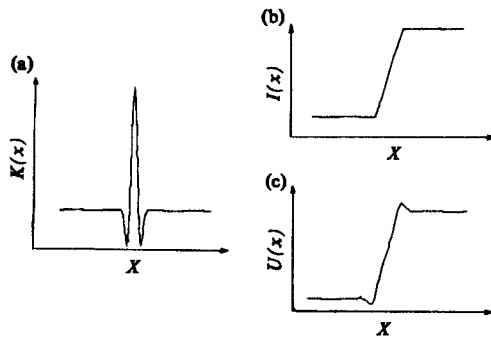


图1 马赫带的数字模拟

(a) 为权函数 Gabor 函数曲线; (b) 为输入函数;
(c) 为输出响应

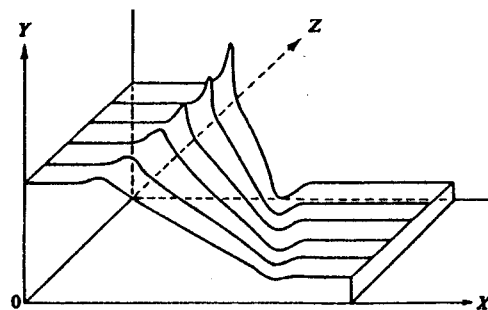


图2 马赫带效应心理学实验的输入刺激

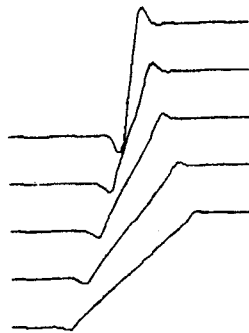


图3 马赫带效应心理学实验的输出响应

3 模拟结果的讨论

正如以上所述, 广义 Gabor 函数的参量取值决定了以此为基础的马赫带的数学模型所独有的特点, 使它不仅从直观上解释了马赫带效应, 而且还可以进一步了解产生马赫带的层次和频率特性, 这些特点主要表现在以下几个方面。

3.1 本文中所取的 EG 函数是各向同性系统的权函数, 这种各向同性主要表现在呈同心圆形状的感受野分布。许多电生理实验结果表明, 大多数的神经节细胞和某些侧膝体细胞都具有这样的同心圆式的感受野, 而脑皮层的电生理实验则证明, 视皮层的简单细胞

和复杂细胞具有条形或其它一些非对称形状的感受野。以往关于视网膜神经节细胞感受野的研究证实, 某些哺乳动物在视网膜水平上已经发生了对视觉信息的初步分析, 然后神经冲动又传到皮层的高级中枢, 再进行更复杂的加工。因此, 我们可以说, 马赫带效应发生在神经节细胞这一层次上, 是在视皮层对刺激图形进行处理之前就已经产生了的视错觉现象, 即马赫带是视觉信息初级处理的结果。这和双眼融合实验所推出的马赫带的产生肯定是单眼的外周过程这一结论完全一致。

3.2 1968年 F. Campbell 和 J. Robson 提出, 视觉系统有不同的独立通道, 分别调谐不同频带的空间频率, 即空间频率的多通道模型。由感受野的大小所推算出的人眼的空间频率基本通道数是 7 个。由图 4 的响应曲线可以明显地看出频率的取值是如何地影响着输出结果, 也正说明只有在低频情况下才能较好地描述马赫带, 即马赫带现象是视觉系统初级信息处理过程中低频信息处理的结果。

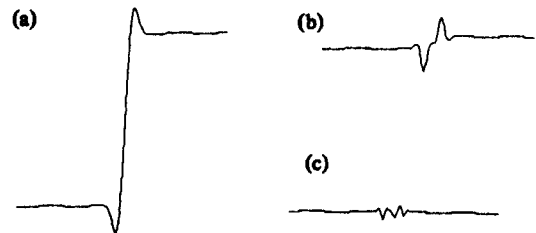


图4 不同频率取值的马赫带刺激图形的响应曲线

(a) $f_x = 2.4$ 度/周; (b) $f_x = 4.0$ 度/周;
(c) $f_x = 6.0$ 度/周

综上所述, EG 函数感受野模型良好地描述了马赫带效应, 同时对于这一错觉现象的较为合理的解释, 亦为 EG 函数的感受野模型提供了又一个证据。

参 考 文 献

- 1 Ratliff F. *Mach Bands*. San Francisco: Holden-Day, Inc., 1965;
- 2 汪云九, 齐翔林. 视觉系统初级信息加工的一种数学模型. 生物物理学报, 1985; 1(2): 123—132
- 3 汪云九, 齐翔林, 邢 静等. 广义 Gabor 函数模型和感受野某些特性曲线的模拟. 中国科学(B 辑), 1989(4): 386—393
- 4 Rodieck R W. Quantitative analysis of cat retinal ganglion cell response to visual stimuli. *Vision Research*, 1965(5): 581
- 5 Marcella S. Mathematical description of the responses of simple cortical cells. *JOSA*, 1980(70): 1297—1300