

视觉神经元感受野与色觉恒常性*

陈继述

(宁波大学物理系, 浙江, 宁波, 315211)

摘要: 提出人的视觉神经元具有感受野是人眼具有色恒常智能的真正根源. 联系感受野的模型函数, 推导出色恒常的明度公式, 并论证它是把现有各种色恒常算法综合于一式的总结性公式. 最后讨论了用明度公式改造色度计的问题.

关键词: 神经网络, 感受野, 色恒常.

引言

人眼感知物体的颜色, 基本上不受邻近物体颜色变化的影响, 也不受辐照光光谱功率分布的影响, 即人的视觉具备良好的色恒常智能. 对色恒常的研究已近30年了. 最早是Land提出的网膜皮层算法^[1], 后来陆续提出了好几种其它色恒常算法^[2,3], 如Hurlbert的多尺度算法^[2]等. 但迄今仍没有令人满意地解决人眼为什么能有色恒常智能的问题.

本文用视觉生理学中几个感受野模型函数推导出一个明度的色恒常算法; 它既推广了Hurlbert的多尺度算法, 又修正了Land的网膜皮层算法, 这样就定量地阐明了人眼的色恒常智能是视锥细胞感受野的产物; 本文最后讨论了估价色恒常度的问题和用明度公式改造色度计的问题.

1 由感受野模型函数确定的明度算法

外界景物成像在网膜上. 网膜上 (x', y') , (x'_i, y'_i) 处视锥细胞与物平面上它们的目标像元 (x, y) , (x_i, y_i) 互成物像关系. (x', y') 处锥细胞接收到目标像元 (x, y) 的光功率分布函数 $P_\lambda(\lambda, x, y)$ 为

$$P_\lambda(\lambda, x, y) = E^*(\lambda, x, y) R^*(\lambda, x, y) S_\Lambda(\lambda). \quad (\Lambda = R, G, B) \quad (1)$$

式(1)中, E^* 为有效辐照功率, R^* 为表面漫反射系数, S 为视锥细胞光谱响应特性. 锥细胞有3个吸收波段, 本文一律用 $(\Lambda = R, G, B)$ 来表示. 锥细胞 (x', y') 从目标像元 (x, y) 接收到每个波段 Λ 的总光功率为上式对 λ 的积分, 积分区间为 Λ .

本文1992年4月29日收到, 修改稿1992年10月17日收到.

*浙江省科委自然科学基金资助课题.

$$P_{\Lambda}^{\wedge}(x, y) = \int_{\Lambda} E^*(\lambda, x, y) R^*(\lambda, x, y) S_{\Lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

所引起的明度感觉记为 $P_{\Lambda}(x', y')$ 或 $P_{\Lambda}(x, y)$, 它是 $P_{\Lambda}^{\wedge}(x, y)$ 的非线性函数. 我们取 \log 函数, 即令

$$P_{\Lambda}(x', y') \equiv P_{\Lambda}(x, y) = \log P_{\Lambda}^{\wedge}(x, y). \quad (3)$$

同样网膜上其他锥细胞 (x'_i, y'_i) 被其目标像元 (x_i, y_i) 引起的明度感觉为

$$P_{\Lambda}(x'_i, y'_i) \equiv P_{\Lambda}(x_i, y_i) = \log P_{\Lambda}^{\wedge}(x_i, y_i), \quad (4)$$

其中

$$P_{\Lambda}^{\wedge}(x_i, y_i) = \int_{\Lambda} E^*(\lambda, x_i, y_i) R^*(\lambda, x_i, y_i) S_{\Lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

网膜上邻近锥细胞之间有直接的和间接的(如通过水平细胞的)突触联系, 形成神经网络, 互相传递明度感觉. 与锥细胞 (x', y') 有突触联系的所有锥细胞 (x'_i, y'_i) (此外还有一些杆细胞) 在网膜上占据的区域, 叫做锥细胞 (x', y') 的感受野. 此感受野中所有锥细胞 (x'_i, y'_i) 对锥细胞 (x', y') 的突触联系的强度分布函数 $f(x'_i - x', y'_i - y')$ 叫做感受野的模型函数. 它同时也是 (x'_i, y'_i) 锥细胞的明度感觉 $P_{\Lambda}(x'_i, y'_i)$ 通过电化学作用向 (x', y') 锥细胞输送的效率函数, 因此, 集中到 (x', y') 锥细胞上对 (x, y) 像元的总明度感觉为

$$L_{\Lambda}(x', y') = P_{\Lambda}(x', y') + \iint f(x'_i - x', y'_i - y') P_{\Lambda}(x'_i, y'_i) dx'_i dy'_i. \quad (6)$$

该明度感觉同时又是人眼对像元 (x, y) 的明度感觉, 故可记为

$$L_{\Lambda}(x, y) = P_{\Lambda}(x, y) + \iint f(x_i - x, y_i - y) P_{\Lambda}(x_i, y_i) dx_i dy_i. \quad (7)$$

式(7)定量地描述了视神经元感受野与目标像元明度之间的联系. 式中的空间座标已从网膜上的 x', y', x'_i, y'_i 变换到物平面上的 x, y, x_i, y_i . 这一座标变换的物理概念是: 网膜上神经网络突触联系和感受野模型函数都可以通过物像关系投射到物平面上. 我们称它为网膜到物平面的投射. 两套座标轴的方向相反.

人的视觉系统从网膜到外侧膝状体, 各种视觉细胞的感受野都近似圆对称. 因此, 我们有

$$f(x_i - x, y_i - y) = f(x - x_i, y - y_i). \quad (8)$$

明度公式(7)变为

$$\begin{aligned} L_{\Lambda}(x, y) &= P_{\Lambda}(x, y) + \iint f(x - x_i, y - y_i) P_{\Lambda}(x_i, y_i) dx_i dy_i \\ &= P_{\Lambda}(x, y) + f(x, y) * P_{\Lambda}(x, y), \end{aligned} \quad (9)$$

式中 * 表示卷积.

式(9)可以变换成为分立像元的形式. 把物平面上的像元(除 (x, y) 外), 记为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$, 便得

$$L_{\Lambda}(x, y) = \log \left[\frac{P_{\Lambda}^*(x, y)}{G_{\Lambda}(x, y)} \right] \quad (10a)$$

式中

$$G_{\Lambda}(x, y) = \left[\prod_{i=1}^N P_{\Lambda}^*(x_i, y_i) e^{-\lambda(x-x_i, y-y_i)} \right]^{1/N} \quad (10b)$$

式 (9)、(10) 是计算圆对称感受野明度的重要公式。

2 推广 Hurlbert 的多尺度算法

视觉生理学中常用的一种感受野模型函数为 DOG 函数:

$$f(x, y) = \text{DOG}(x, y, t_1, t_2) \equiv G(x, y, t_1) - G(x, y, t_2) \quad (11)$$

其中高斯函数 $G(x, y, t)$ 的定义为

$$G(x, y, t) \equiv \frac{1}{4\pi t} e^{-(x^2+y^2)/4t} \quad (12)$$

由此可证明

$$\text{DOG}(x, y, t_1, t_2) = - \int_{t_1}^{t_2} \nabla^2 G(x, y, t) dt \quad (13)$$

式中 ∇^2 为拉普拉斯算符。

以式 (11) 代入明度公式 (9), 得

$$L_{\Lambda}(x, y) = P_{\Lambda}(x, y) + \text{DOG}(x, y, t_1, t_2) * P_{\Lambda}(x, y),$$

应用式 (13) 可得

$$L_{\Lambda}(x, y) = P_{\Lambda}(x, y) - \int_{t_1}^{t_2} dt \iint \nabla^2 G(x - \xi, y - \eta, t) P_{\Lambda}(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (14)$$

式 (14) 便是 Hurlbert 多尺度色恒常算法的推广, Hurlbert 的算式原来只适用于辐照光均匀的情况, 而现在式 (14) 对辐照光和表面漫反射系数在物平面上的变化都不加限制。

3 修正 Land 的网膜皮层算法

任意地取下式作为“感受野模型函数”:

$$f(x - x_i, y - y_i) = -1, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

代入分立像元形式的明度公式 (10), 立刻得到 Land 的网膜皮层算法

$$L_{\Lambda}(x, y) = \log \frac{P_{\Lambda}^*(x, y)}{\left[\prod_{i=1}^N P_{\Lambda}^*(x_i, y_i) \right]^{1/N}} \quad (16)$$

Land 早期取 $N \rightarrow \infty$. 计算机数值计算证明, 对 $N \rightarrow \infty$ 的式 (16), 色恒常性极差. 事实上如对式 (15) 取 $N \rightarrow \infty$, 它与视细胞感受野模型函数差别就太大, 人眼不可能有这样大 (无限大) 的抑制感受野, 这就是 Land 早期网膜皮层算法失败的原因.

Land 后期对式 (16) 中的 N 凭色觉实验验证取适当大小, 结果算出的明度相当不错^[4]. 这是不难解释的, 因为此时式 (15) 与视细胞感受野不像 $N \rightarrow \infty$ 时那样相差悬殊了. 但即使 N 取适当大小, 式 (15) 仍不可能与视细胞感受野模型十分近似. 因为感受野模型都多少呈墨西哥草帽型, 是常数形式 (15) 无法近似的. 可见早期与后期的 Land 网膜皮层算法都需要修正.

用本文明度公式修正 Land 网膜皮层算法的办法很简单, 即直接用明度公式 (10) 代替网膜皮层算法, 式 (10) 中的 $f(x-x_i, y-y_i)$ 应该是视觉生理中的视细胞感受野模型函数, 如 DOG 函数、LOG 函数、高阶微分高斯函数、Gabor 函数等^[5~10].

4 色恒常度的定义

Land 通过讨论一个实验^[4]明白无误地指出: 光度计测不出肉眼看得见的 Mach 带, 而 Land 后期网膜皮层算法却算得出肉眼能看见的 Mach 带. 这暗示在某些情况下, 色度计测出的颜色与肉眼不符, 而色恒常算法算出的颜色却总能与肉眼相符. 那时就会发生按色恒常算法校正色度计的实际问题.

公式 (9) 可改写成为

$$L_{\Lambda}(x, y) = F^{-1}[FP_{\Lambda}(x, y) + Ff(x, y) \cdot FP_{\Lambda}(x, y)]. \quad (17)$$

式中 F 为傅里叶变换, F^{-1} 为逆傅里叶变换, 式 (17) 可以用光学方法或光电混合方法实现^[5]. 式中的 $P_{\Lambda}(x, y)$ 为色度计测得的明度, 没有色恒常性. $L_{\Lambda}(x, y)$ 为人眼感知的明度, 有色恒常性. 式 (17) 就是如何校正色度计使之具有人眼色恒常智能的技术原理.

下面给出衡量色恒常智能的色恒常度的 3 个定义 (为简便, 略去波段标记 Λ). 定义

$$C_{E^*}(x, y) \equiv \left[\sum_{n=1}^W \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial L(x, y)}{\partial E^*(\lambda_n, x_i, y_i)} \right|^2 \right]^{-1/2} \quad (18)$$

为像元明度 $L(x, y)$ 对有效辐照功率 E^* 的色恒常度; 定义

$$C_{R^*}(x, y) \equiv \left[\sum_{n=1}^W \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial L(x, y)}{\partial R^*(\lambda_n, x_i, y_i)} \right|^2 \right]^{-1/2} \quad (19)$$

为像元明度 $L(x, y)$ 对像元表面漫反射系数 R^* 的色恒常度; 定义

$$C_{E^*R^*}(x, y) \equiv \left[\sum_{n=1}^W \sum_{i=1}^N \left(\left| \frac{\partial L(x, y)}{\partial E^*(\lambda_n, x_i, y_i)} \right|^2 + \left| \frac{\partial L(x, y)}{\partial R^*(\lambda_n, x_i, y_i)} \right|^2 \right) \right]^{-1/2} \quad (20)$$

为像元明度 $L(x, y)$ 对 E^* 和 R^* 的总色恒常度. 在以上三式中, 我们把连续波长划分为 W 个波段 λ_n ($n = 1, 2, \dots, W$).

从这些定义 (以及根据需要增加的其他色恒常度的定义) 出发, 可以设计出测量色恒常度的仪器和标准, 并可规定色度计等仪器的 C_{E^*} 、 C_{R^*} 和 $C_{E^*R^*}$ 的等级. 但为此还

须完成大量的工作, 例如用标准色卡制造标准蒙德伦、制造 $S(\lambda_n)$ 模拟器和用标准光源提供 $E^*(\lambda_n, x_i, y_i)$ 等等.

5 结论

本文推导出由锥细胞感受野模型函数确定的明度的计算公式 (7)、(9)、(10), 并用它们推广了 Hurlbert 的多尺度色恒常算法, 和修正了 Land 的网膜皮层算法. 从而定量地阐明了人眼视觉的色恒常智能是视细胞神经网络形成感受野的结果.

由于色度计等仪器没有色恒常智能, 与人眼视觉不相符, 所以将来会发生用色恒常算法校正色度计的问题. 本文叙述了校正方法的原理, 并给出了 3 个色恒常度的定义.

至此, 本文只考虑锥细胞 (x', y') 的感受野与色恒常的关系, 并未考虑其余锥细胞 (x_i', y_i') 也都具有感受野. 考虑到后者, 式 (9) 应改为逐步逼近式:

$$\begin{aligned} L_{\Lambda}^{(n+1)}(x, y) &= P_{\Lambda}(x, y) + f(x, y) * L_{\Lambda}^{(n)}(x, y), \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \\ L_{\Lambda}^{(0)}(x, y) &= P_{\Lambda}(x, y). \end{aligned} \quad (21)$$

其余明度公式亦须作相应改变. 式 (9) 只相当于式 (21) 在 $n = 0$ 时的一级近似算法.

考虑所有锥细胞都具有感受野, 还可将式 (9) 改为

$$L_{\Lambda}(x, y) = P_{\Lambda}(x, y) + f(x, y) * L_{\Lambda}(x, y). \quad (22)$$

式 (22) 可用傅里叶变换 F 和其逆变换 F^{-1} , 求得下列形式的解:

$$L_{\Lambda}(x, y) = F^{-1} \left\{ \frac{F[P_{\Lambda}(x, y)]}{1 - F[f(x, y)]} \right\}. \quad (23)$$

至此解决锥细胞感受野与色恒常关系的计算公式最后共有三套: 第一套是式 (9) 和 (10), 它们是一级近似; 第二套是式 (21), 它们是逐次逼近算法; 第三套是式 (23). 在进行数值计算时, 可根据计算工作量和精度要求, 决定采用那一套计算公式. 诸式中 $P_{\Lambda}(x, y)$ 均按式 (3) 和 (2) 计算. 对一般问题, 估算采用式 (9) 和 (10) 较为适宜.

致谢: 由编辑部转来的审稿意见对式 (22) 提出的问题作者表示诚挚的谢意.

参考文献

- 1 David H Brainard, Brian A Wandell. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, A3:1651
- 2 Anya Hurlbert. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, A3:1684
- 3 金文英. 兰德网膜皮层色觉理论的基础及计算方法的心理物理学研究, 浙江大学博士学位论文, 1989
- 4 Edwin H Land. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1986, 83:3078
- 5 游龙翔. 视觉系统信息处理机制及其光学模拟实现研究, 浙江大学博士学位论文, 1991
- 6 汪云九等. *生物物理学报*, 1989, 4(1):39
- 7 Wilson H R, McFariane D K, Philips G C. *Vision Res.*, 1983, 23:873
- 8 Marcelja S. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, 70:1297
- 9 Stork D G, Wilson H R. *J. Opt. Soc. Am.*, 1990, A7:1362
- 10 Sotak G E et al. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1989, 48:147

THE RELATION BETWEEN RECEPTIVE FIELD OF VISUAL NEURONS AND COLOR CONSTANCY*

Chen Jishu

(Department of Physics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: It is argued that it is the receptive field of visual neurons that enables people to maintain approximately color constancy despite variation in the spectral power distribution of the ambient light and despite variation in the color of nearby objects. A lightness algorithm based on the model function of receptive field of human visual neurons is proposed and is proved to be a general color-constant algorithm as well as an adequate model of human color constancy performance. Problems about lack of color constancy of colorimeters are briefly discussed.

Key words: neural network, receptive field, color constancy.

* The project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China.