

感知编码的一种新理论

——空间对数变换理论

于德山* 汪云九

(中国科学院生物物理研究所, 北京)

动物和人类是怎样对外部世界进行感知编码的? 这历来是神经生理学中一个重大的问题, 就此有人提出了各种各样的理论。比较著名的有早期“格式塔”理论、空间频率通道理论以及单细胞特征提取理论, 它们都是从不同的角度, 对感知编码的可能机制进行了探讨。美国纽约大学医学中心的 E. L. Schwartz 近年来提出了一种崭新的理论——空间对数变换理论^[1], 它从视网膜一皮层的空间投射性质入手, 对视觉研究中的几个基本问题如视觉不变性、Mackay 互补图后效应、视错觉现象和 Julesz “质

地检测”理论等进行了独到的探讨。

一、空间对数变换理论的提出

为了探讨网膜一初级视皮层的投射关系, 用小光点刺激网膜来记录皮层反应部位的规律。小光点在网膜上每移动 1° , 其在纹状皮层上相应反应点移动的距离 (单位: mm) 叫作放大率。如果用 r 代表网膜平面上刺激光点的离心度, w 代表纹状皮层表面位置, M 代表放大率

* 八三届研究生

卡拉胶的小鼠, 抗 γ -线电离辐射能力明显提高^[4]。

此外, 还有报道卡拉胶对人血有抗凝血活性; 可治疗血管病患; 能结合铅及其它重金属离子; 能与阳离子型染料反应而使颜色稳定。这些特性均有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Martin Glicksman: In *Food Carbohydrates* (Ed. David R. Lineback, et al.), Saybrook Press, Inc., Westport, Connecticut, 270, 1982.
- [2] Charles W. Greer, et al.: *Carbohydrate Research*, 129, 189, 1984.
- [3] Rees, D. A. et al.: In *The Polysaccharides 1* (Ed. Gerald O. Aspinall), Academic Press, INC., New York, 195, 1982.
- [4] Morris, E. R. et al.: *Journal of Molecular Biology*, 138, 349, 1980.
- [5] Wotose, J.: *Journal of Texture Studies*, 12, 427, 1981.
- [6] Watase, M.: *Colloid and Polymer Science*, 266, 971, 1982.

- [7] Smidsrod, O. et al.: *Acta Chemica Scandinavica*, 21, 2585, 1967.
- [8] Takata Isao, et al.: *Ferment. Technol.*, 60, 431, 1982.
- [9] Chibata, I. et al.: *Enzyme Engineering*, 5, 393, 1980.
- [10] Claffoy, Kevin.: US 4, 318, 746 (CI. 106—194, Co8LI/28) 1982.
- [11] 唐家骏等: 《生物化学与生物物理学报》, 17, 231, 1985.
- [12] Ledward, D. A.: In *Polysaccharides in Foods* (Ed. J. M. V. Blanshard, et al.), Butterworths, Boston 214, 1978.
- [13] Hoppe, H. A.: In *Marine Algae in Pharmaceutical Science*, Walter de Gruyter, Berlin. New York, 25, 1979.
- [14] Bhakuni, D. S. et al.: *Botanica Marina*, 17, 40, 1974.
- [15] Neveu P. J. et al.: *International Journal of Immunopharmacology*, 4, 175, 1982.
- [16] Tang Chiachun, et al.: In 'REVISTA TORTUGUESA DE QUIMICA, 2nd International Conference on Bioorganic Chemistry, Lisboa, 424, 1985.

【本文于 1985 年 11 月 16 日收到】

则:

$$M = \frac{dw}{dr} = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{w(r + \Delta r) - w(r)}{\Delta r}$$

在猴中得到放大率 M 和离心度 r 关系的实验曲线(图 1)^[2]

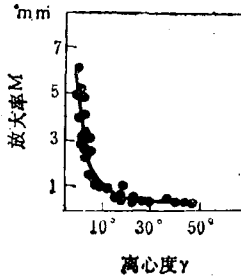


图 1 恒河猴放大率 M 和离心度 r 关系的实验曲线^[2]

由图 1 可知, M 和 $\frac{1}{r}$ 约成线性关系即:

$$\frac{dw}{dr} \propto \frac{1}{r}$$

这样的函数是 $w = k \log r$ 。如果用复数 z 代表网膜平面点(用极坐标表示), w 代表皮层平面点(用直角坐标表示), 则有 $w = k \log z$ 。为消除其中 $z = 0$ (即网膜中央凹) 的不解析性, 取为 $w = k \log(z + a)$, 其中 a 为一实常数, 一般由实验决定, 这就是网膜—皮层空间投射的对数关系式。

图 2 中“实验”项下的一系列图形是用一些动物(标在左边)做实验时记录得到的, 这些图实际上就是 $z-w$ 变换图。右边“理论”项下是根据对数变换式 $w = \log(z + a)$ 、由计算机产

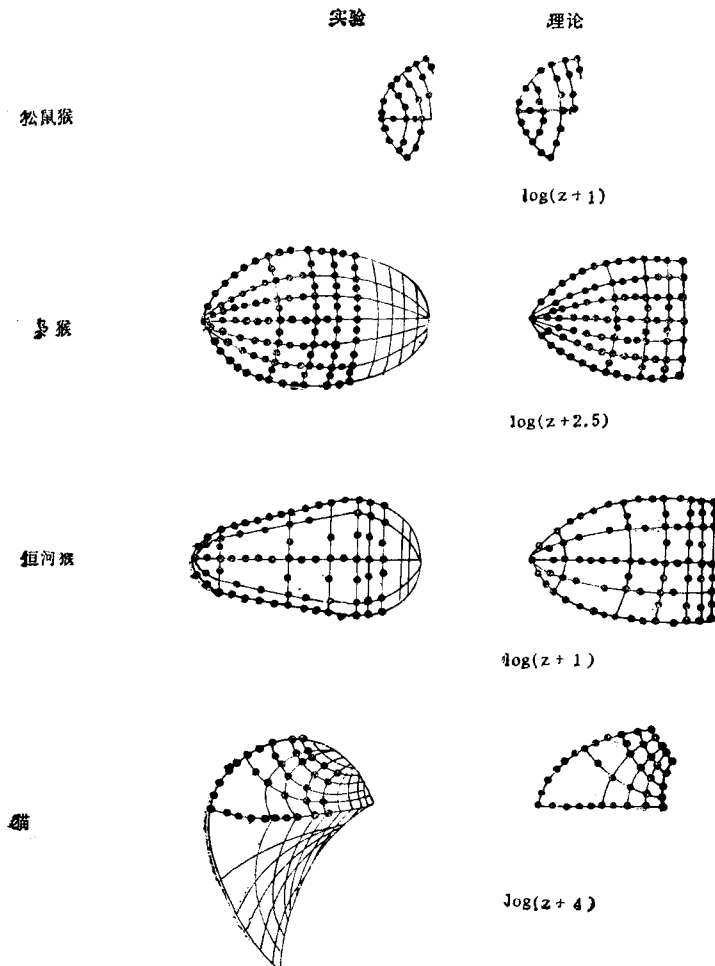


图 2 网膜—皮层复对数变换: 实验和理论比较^[1]

生的一系列图形,调节参数 a , 使之与实验图形最为接近。从图 2 中看出, 除猫视野下半部分不符合对数变换外, 其余都符合得很好, 这有力地证实了上述对数变换关系的正确性^[3]。

已经发现, 双翅目动物单眼小网膜细胞到视皮层的投射模式和一些热带淡水鱼视野在视通路中的投射模式也都具有对数变换性质^[1,3]。

已经有实验证实, 不仅在初级视皮层 (17 区) 存在这种投射关系, 在其它视区 (18 区、19 区)、感觉区、运动区、上丘等也存在这种投射关系。这说明, 空间对数变换在动物神经系统内是一种相当普遍的现象^[2,4]。

二、空间对数变换的性质

上面讲到, 空间对数变换理论是由 $w = k \log(z + a)$ 刻画的, 当 $a \approx 0$ 时, w 在网膜中央凹是解析的, 变换是一种保角变换, 即变换具有保持图形局部角度不变的性质; 其次, 对数变换主要具有表 1 所列性质:

表 1 空间对数变换性质

z	$w = k \log z$
1. 半径按指数增加的同心环	等间隔平行垂直线
2. 等角间隔的辐射线	等间隔平行水平线
3. 对数螺旋线 ($Q = Ae^{k\phi}$)	等间隔平行斜直线斜率 $= 1/k$ 截距 $= (-\log A/k)$

这些性质是对数变换的特异性, 可据此判断一种变换是否是对数变换。

在网膜中央凹 ($z = 0$) 附近的半圆环不能变成垂直线, 辐射直线不能变成水平平行线, 因为:

$$w = k \log(z + a)$$

$$\frac{dw}{dz} = k/(z + a)$$

当 $z \ll a$ 时, $dw/dz \approx a$, 说明此时 w 和 z 是一种线性变换关系, 它使圆环变圆环, 辐射线变成辐射线, 是一种保角变换, $z \approx 0$ 就属于这一情形。只有当 $z \gg a$ 时, $dw/dz \approx k/z$, $w \approx k \log z$ 才成为名副其实的的对数变换, 具有表 1 所列的性质, 但不是保角变换。

根据 1981 年诺贝尔奖获得者 Hubel 和

Wiesel 的工作, 在皮层, 对局部信息进行处理的是“超柱”结构。“超柱”由方位柱和眼优势柱组成, 方位柱是一系列平行的小柱, 每个小柱对相差 $10^\circ - 15^\circ$ 的方位敏感, 这样局部区域的等角辐射线投射到一系列平行的方位柱, 因此, 网膜一皮层的局部投射和整体上的投射一样, 都是对数变换, 它们把极坐标变成直角坐标, 而且极坐标矢径的分度以对数为单位。

总的看来, 这种对数变换关系也是很有意义的。在网膜上的一些同心圆, 在取中心的较密而远离中心的较疏时, 它们在皮层却都投射成等间隔的平行线, 这说明, 皮层对网膜中央凹局部区域的信息加工很精细, 对周边部的信息则进行了对数压缩。这也是可以想象的, 因为当观察重要事物时, 总是调节眼球, 使之成象在中央凹位置, 这样能对其信息作最大、最快、最准确提取, 而对其它一些背景物体则通过周边获得粗略信息已经足够。

三、空间对数变换和视觉不变性

“视觉不变性”是视觉系统的一个重要特性。有人认为它反映了视觉系统信息加工的基本特性。任何一个关于视觉系统信息加工的理论

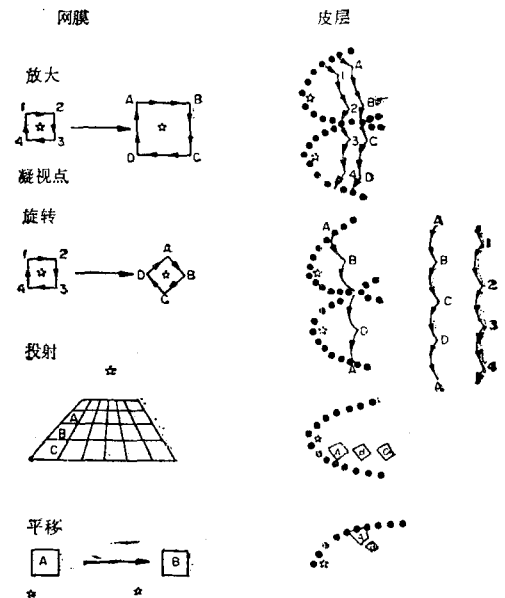


图 3 复对数变换对“视觉不变性”的解释

论,都不能回避对这一特性给出解释。

“视觉不变性”是指,当物体进行平移、旋转、放大或投影变换时,我们能够保持对其形状不变的感觉。这是如何形成的呢? Schwartz 的理论对此作了解释。(图 3)^[1]

图 3 给出了对网膜的四种刺激变换在皮层对应的模式,即放大、旋转、投影、平移。假定对数变换形式为 $w = \log(z + 1)$,图 3 左的“☆”为凝视点,则可以看出:在放大和旋转变换情形,其对应的皮层模式大小和形状均无变化,只是在水平或垂直方向上有一定位移,这不仅给出了“视觉不变性”,而且使我们看到它获得这种性质多么轻而易举。在网膜水平,图形放大或旋转都是和较复杂的乘法运算相联系的,而在皮层,它仅是作了平移而已!实际上,这正是由于对数变换的优越性。假定复数 z 代表几何点,以某一图形为点集 $\{z\}$,图形放大 k 倍,等价

于其点集乘以一个实常数 k 变为 $\{kz\}$;图形旋转 θ 角,等于其点集乘以一个复常数 $e^{i\theta}$,变图形为 $\{e^{i\theta} \cdot z\}$,而在皮层,由于对数变换,放大 k 倍只是从点集 $\{\log z\}$ 变到 $\{\log(k \cdot z)\} = \{\log k + \log z\}$,在实轴平移 $\log k$;旋转 θ 角,只是从点集 $\{\log z\}$ 变到 $\{\log z \cdot e^{i\theta}\} = \{\log z + i\theta\}$,在虚轴平移 θ ,可以想到,对于一般既有放大又有旋转变换,也只是平移,只不过在实、虚轴都有一定平移而已。

对于投影图形,由于它们都夹在两放射直线之间,根据对数变换,在皮层,这些放射直线投射成平行直线,因此投影图形 A、B、C 在皮层变成形状和大小都是一样的,同样保持了“视觉不变性”。

最后,对于平移变换,皮层的两个图形模式形状和大小都发生了变化,但由于对数变换是一种保角变换,每个模式的局部角仍然不变,这是这种情形的“视觉不变性”的基础。

四、空间对数变换和 Mackay 互补图后效应

Mackay 互补图(图 4)图 4A 和 4B 是一互补对,图 4C 则和反时针方向的对数螺线成互补对。注视图 4A 几秒钟,你就会发现好象有图 4B 中的放射线出现;注视图 4B 几秒钟,你又会发现有图 4A 中的同心圆环出现,这就是它们的互补后效应。

这也可以根据 Schwartz 对数变换理论加以说明。^[1,5]图 4 右侧画出了对应的对数变换图 ($w = \log z$)。可以看出,图 4A 的变换是竖直的平行线,而图 4B 的变换则是水平平行线,这一互补对的对数变换恰是正交的。图 4C 对数螺线的变换则是斜的直线,可以算出其反时针方向的互补图的变换也是斜的直线,而且与其恰恰正交。这说明在网膜水平的互补图对,在皮层水平则相互正交,这深刻揭示了互补图的本质。也说明,只有在皮层水平而不是在网膜水平,才能理

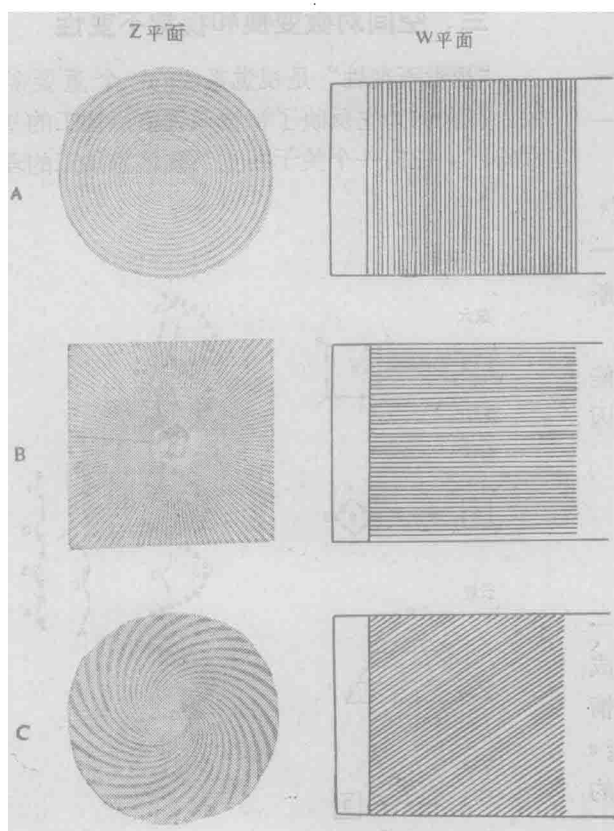


图 4 Mackay 互补刺激图的对数变换^[1]

解象互补图这种视现象的本质。

那么为什么在皮层正交的刺激图对会引起互补后效应呢?图5给出了解释。在互补图对A、B中各取一小片段a、b,将其对应的超柱模式画在下边,短粗黑棒代表兴奋的方位柱,稍长的黑棒代表眼优势柱。把相应方位柱序列活动模式放在一起(图5下部),进行对比,就可以发现:图5B的每一兴奋的方位柱都夹在图5A两兴奋方位柱之间,而且大致在中间。这是因为这两个图的皮层图相互正交,而每一超

柱包括在 180° 范围内敏感的方位柱,相互正交的两个方位,正好相距半个超柱的距离,自然就会出现夹在中间的现象了。在方位柱间存在很强的侧抑制,以保持严格的方位调制。当用某一互补图刺激时,则方位柱出现相应活动模式,它使邻近方位柱受到强的侧抑制作用,但时间一长,由于适应,活动性降低,对周围方位柱侧抑制减弱,结果使离它最远(相隔半个超柱)的、受到抑制最弱的方位柱去抑制而进入活动状态,这些方位柱的方位正好和原兴奋方位柱的

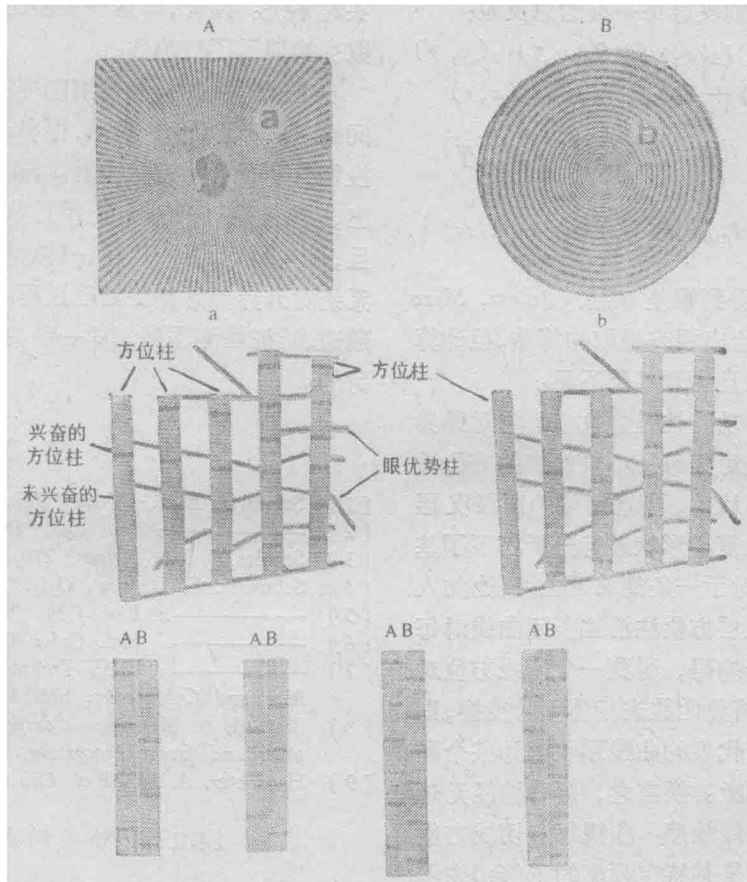


图5 Mackay 互补图对后效应的方位柱机制

方位垂直,从而引起对刺激图的互补图的感知。

五、皮层的柱状构筑和视差提取、形状分析

皮层的柱状构筑是一种普遍现象。视皮层、听皮层和感觉皮层等都存在这种结构。其功能意义众说纷纭,至今还没有定量的数学模式。

Schwartz 在研究网膜一皮层空间投射的基础上,对此也提出了一种新颖的解释^[6]。

他认为,视皮层的左右眼优势柱周期性交替排列,可能是视差提取机制的基础。设 $I_R(x, y)$, $I_L(x, y)$ 分别为看一立体景物时右眼和左眼的网膜像,它们稍有不同,通过空间投射,在一侧皮层通过左、右眼优势柱编码。右眼优势柱

对右眼网膜像 $I_R(x, y)$ 反应, 对左眼网膜像 $I_L(x, y)$ 不反应, 左眼优势柱正好相反。因此, 如果令

$$R_1(x, y) = 1 + \sum_n a_n \sin(2\pi nx/\omega)$$

$$\begin{aligned} R_2(x, y) &= 1 + \sum_n a_n \sin(2\pi nx/\omega + \pi) \\ &= 1 - \sum_n a_n \sin(2\pi nx/\omega) \end{aligned}$$

其中 ω 为左、右眼优势柱排列周期, 并适当取值 a_n 使之成为方波, 则皮层每一点的总反应:

$$\begin{aligned} I_c(x, y) &= R_1(x, y)I_L(x, y) + R_2(x, y)I_R(x, y) \\ &= I_L(x, y) + I_R(x, y) + (I_L(x, y) \\ &\quad - I_R(x, y)) \cdot \sum_n a_n \sin(2\pi nx/\omega) \\ &= I_{\text{sum}} + I_{\text{diff}} \cdot \sum_n a_n \sin(2\pi nx/\omega) \end{aligned}$$

再通过滤波, 即可得到视差 I_{diff} 。Julesz, Marr 和 Poggio 等也曾给出视差提取的算法, 但计算量颇大, 非实时的, 且生理基础不足。

皮层另外一种功能柱是方位柱。它对外界物体的编码方式是对其每一小段轮廓的方位进行编码。Schwartz 认为, ^[7]这可能为高级皮层(如颞叶)神经元对复杂形状进行分析打下了基础。他的假说是, 对于一条简单闭曲线(比如人手轮廓), 初级视皮层方位柱沿这条闭曲线对每一点切线方位进行编码, 得到一个切线方位对曲线周长的函数, 将此函数进行傅里叶变换, 则每一个离散频线所代表的曲线形状恰为某个颞叶神经元的最佳刺激。换言之, 颞叶神经元对这样一种曲线形状最敏感: 曲线每点切线方位和周长的函数关系是某特定频率的正(余)弦函

数。因此, 对于一个复杂形状, 颞叶的不同神经元发生反应, 相互作用, 对其编码。

据最近文献^[8]报道, 已经有人根据上述空间对数变换理论, 提出了在计算机模式识别中应用的可能性。模式识别面临一个主要问题, 就是如何在外界模式位移、放大、旋转时, 保持识别结果的不变性。以往采用的一些变换, 如傅里叶变换、Mellen-Fourier 变换等, 有二个缺点: 一个是它们不能严格保持上述三种情形下的不变性, 再一个它们要进行很多计算, 是非实时系统。因此, 与这些变换比较起来, 空间对数变换显示了优越性。

空间对数变换理论刚刚提出, 还存在很多问题。最近有文献^[9]指出, 很多动物网膜一皮层投射并非严格的对数投射。Schwartz 自己也指出, 猫视野下半部就不能用对数投射来描述。而且, 最主要问题是, 这样一种对数变换, 在视觉系统对外界信息加工处理过程中, 和空间频率通道、特征检测器是怎样一种关系, 仍是需要探讨的。

参 考 文 献

- [1] Schwartz, E. L.: *Vision Res.*, **20**, 645, 1980.
- [2] ———: *Biol. Cyb.*, **25**, 181, 1977.
- [3] Scholes, J. H.: *Nature*, **278**, 620, 1979.
- [4] Schwartz, E. L.: *Biol. Cyb.*, **29**, 1, 1977.
- [5] ———: *Biol. Cyb.*, **37**, 63, 1980.
- [6] ———: *Biol. Cyb.*, **42**, 157, 1982.
- [7] ———: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-14, 257, 1984.
- [8] Richard, A. Messner: *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, **31**, 50, 1985.
- [9] Hanspeter, A. M.: *Biol. Cyb.*, **52**, 45, 1985.

[本文于 1985 年 10 月 25 日收到]