

Off 型感受野研究及在红外图像处理中的应用*

王立 张科 李言俊

(西北工业大学航天工程学院导航制导教研室, 陕西, 西安, 710072)

摘要 论证了感受野(RF)学说和侧抑制(LI)理论的本质一致性. 引入医学领域眼球微动现象, 在视觉瞬间, 指出物象斑将不可避免地交替出现在 On 型感受野(On-center RF)和 Off 型感受野(Off-center RF)之间, 据此提出了新的视觉机理假说. 描述了 Off 型感受野的特征, 并建立描述 Off 型感受野的数学模型. 基于此模型探讨了新的边缘检测算法, 应用于军事红外图像处理, 显示了该算法的快速性以及目标几何特征的放大能力.

关键词 Off 型感受野, 侧抑制, 眼球微动, 边缘提取.

THE STUDY OF OFF-CENTER RECEPTIVE FIELDS AND THE APPLICATION FOR INFRARED IMAGE*

WANG Li ZHANG Ke LI Yan-Jun

(Navigation and guidance lab of College of Astronautics, NPU, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The receptive field (RF) theory and the lateral inhibition (LI) mechanism are of the same view. According to the eye's microsaccade phenomena supported by the medicine field, the proposed opinion states that image spot of object will project the On-center RF and off-center RF alternatively in the split seconds, so a new vision mechanism's assume based on this opinion is proposed; this paper discussed the property of Off-center RF in detail, and put forward a mathematic model that has a advantage to carry out the edge-detecting algorithm, especially to the military IR image, this algorithm posses the characteristics of speeding and feature-magnify.

Key words off-center RF, later inhibition, eye microsaccade, edge detecting.

引言

仿生学的研究一直推动着人类技术的进步, 生物视觉的探索正成为当前人工智能革命一个主要思维来源, 章鱼、蝇复眼、蛙眼等生物眼研究在各个方面开辟的新技术、新产品领域是有目共睹的. 特别是 Hartline^[1] 等人通过 40 年对章鱼的研究提出了侧抑制理论揭示了生物视觉信息处理的机制, 完美的解释了人类视觉增强反差、勾边的生理现象, 并在图像增强、边缘提取领域获得了很好的应用.

Hartline 之后, 对视觉的研究特别在实验领域取得了更为广泛的研究成果, 与侧抑制理论相关的热点问题集中在 2 种感受野——On 型感受野和 Off 型感受野的数学模拟及其相互之间的关系上面. On 型感受野和侧抑制理论存在什么关系?

Off 型感受野在视觉中的作用机理是什么? 本文针对上面 2 个问题进行了研究, 并给出 Off 感受野的数学模型, 以及在军事红外图像处理领域的探索性应用.

1 视觉感受野

Kuffler^[2] 于 1953 年首次阐明猫的视网膜神经节细胞(GC)的感受野在反应敏感性的空间分布是一个同心圆, 根据兴奋区和抑制区的位置分为 2 类, On 型感受野和 Off 型感受野. 后来在对猴视网膜的实验中, 证实了 On 型和 Off 型是一种均匀镶嵌式的排列, 其总数基本相等, 2 种感受野模型如图 1、图 2 所示.

针对 On 型感受野模型, 国内外学者进行了广泛深入的研究, 例如紫茵膜对同心圆感受野的模拟^[3,4] 等. 利用 On 型感受野模型, 还可以很好地解

* 国家航天创新基金资助项目(批准号 2000CH8080)

稿件收到日期 2002 - 07 - 27, 修改稿收到日期 2002 - 12 - 23

* The project supported by the National Aerospace Innovation Foundation of China (No.2000CH8080)

Received 2002 - 07 - 27, revised 2002 - 12 - 23

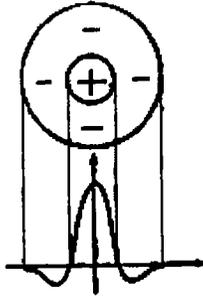


图 1 On 型感受野
Fig. 1 On-Center RF

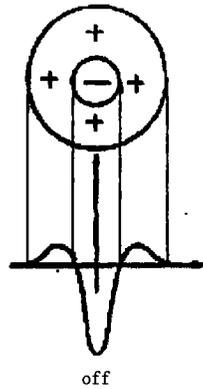


图 2 Off 型感受野
Fig. 2 Off-Center RF

释人眼的勾边、边缘增强功能,以及马赫带等视觉现象.从这一点可联想到 Hartline 发现的侧抑制原理,根据著名的 Hartline-Ratliff 方程^[5]:

$$\begin{cases} r_a = e_a - h_{ab} \cdot e_b \\ r_b = e_b - h_{ba} \cdot e_a \end{cases} \quad (1)$$

图像经过侧抑制网络,输出的结果等价于图像对于模板的卷积运算,常见的算法公式为

$$G(x, y) = F(x, y) - F(x, y) \otimes H(i, j). \quad (2)$$

$F(x, y)$ 为输入图像矩阵, $G(x, y)$ 代表输出图像矩阵,符号 \otimes 代表卷积运算, $H(i, j)$ 为抑制系数矩阵,其中 $H(i, j)$ 的 5×5 数字化模板形式为

$$H(i, j) = \begin{bmatrix} h(1,1) & h(1,2) & h(1,3) & h(1,4) & h(1,5) \\ h(2,1) & h(2,2) & h(2,3) & h(2,4) & h(2,5) \\ h(3,1) & h(3,2) & 0 & h(3,4) & h(3,5) \\ h(4,1) & h(4,2) & h(4,3) & h(4,4) & h(4,5) \\ h(5,1) & h(5,2) & h(5,3) & h(5,4) & h(5,5) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$h(i, j)$ 代表了处于位置 (i, j) 处的神经元对中心位置 $(3, 3)$ 处的神经元的抑制参数,式(2)可以写成

$$\begin{aligned} G(x, y) &= F(x, y) \otimes (1 - H(I, j)) \\ &= F(x, y) \otimes A(i, j). \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $A(i, j) = 1 - H(i, j)$ 有

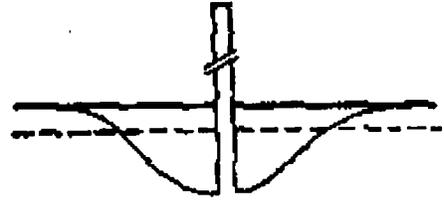


图 3 Hartline 和 Ratliff 侧抑制模型
Fig. 3 Hartline and Ratliff inhibition model

$$A(i, j) = \begin{bmatrix} -h(1,1) & -h(1,2) & -h(1,3) & -h(1,4) & -h(1,5) \\ -h(2,1) & -h(2,2) & -h(2,3) & -h(2,4) & -h(2,5) \\ -h(3,1) & -h(3,2) & 1 & -h(3,4) & -h(3,5) \\ -h(4,1) & -h(4,2) & -h(4,3) & -h(4,4) & -h(4,5) \\ -h(5,1) & -h(5,2) & -h(5,3) & -h(5,4) & -h(5,5) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

下面给出 $A(i, j)$ 对应模型的 2 种时域表达:

图 3 是 Hartline 和 Ratliff 给出的勾边效应的数学模型,图 4 为 Taylor 在 1956 年提出的脊椎动物视网膜模型^[5].可以这样理解:中心的 1 值代表了兴奋区参数而负值代表了两侧细胞对兴奋的抑制,所以侧抑制原理和 On 型感受野在本质上是一致的.

Off 型感受野,数学模拟时中兴奋点的出现会引起负值,生理电信号的发放频率降低,似乎代表了人眼对视场内景物变化的阻碍,当然对人眼的勾边、轮廓增强特性以及马赫带的解释等现象均没有什么贡献,因此对它的性质并没有太多的说明,已有理论集中在对应的双极性细胞分别和 On 型、Off 型感受野的连接上,认为 Off 型感受野通过双极性细胞传递负响应,On 型感受野通过双极性细胞传递正响应,另有认为由于 Off 感受野的存在,当光线照射不到感受野中心仅存于抑制区时,仍会产生兴奋的反应.以上的说法都有其合理性,但我们认为 Off 型感受野的存在理应在地位上和 On 型感受野有同样的价值和意义,两者应该是相辅相成的工作.结合眼球微动现象^[6]:人的眼球总是处于不停地微动,这种无意识轻微运动(100 次/s 以上),如果让一个人凝视一个物体而不准他做眼球的微小运动,就会有所看到的物体在一瞬间从视野中消失的感觉.人眼之所以能够精确地看

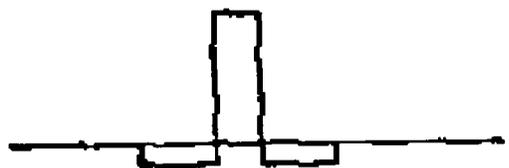


图 4 Taylor 侧抑制模型
Fig. 4 Taylor inhibition model

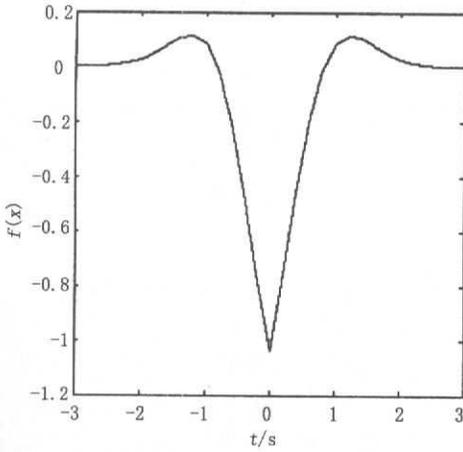


图5 模型时域曲线
Fig.5 The model's response in Spatial Domain

到物体是因为具有避免视网膜对刺激产生疲劳而使眼球进行快速而细微运动的结果.人眼的这种微动将带来场景中物体在 On 型感受野和 Off 感受野上交替的出现,基于此本文提出下面的 Off 型感受野 On 型感受野交替作用假说.

视神经系统存在一个生理电信号恒定发放频率 f_v ,它对应无刺激的频率发放,数学模拟的正负值意义分别为正值 $f > f_v$ 和负值 $f < f_v$.人眼的不停跳动会使物体的边缘在 Off 型感受野和 On 型感受野交替出现,同质区部分在 On 型感受野和 Off 型感受野的输出都很小,因此产生的生理电信号偏差很小,而视场中的边缘处将会出现正负信号的发放,产生生理电信号的偏差很大,这种边差在视觉上的反映造成了对视野中边缘部分的突出,并且引起视觉系统对视场中变化的强烈反应.

2 Off 型感受野数学模型

在研究感受野特性的时候,从 Rodieck^[7] 首先提

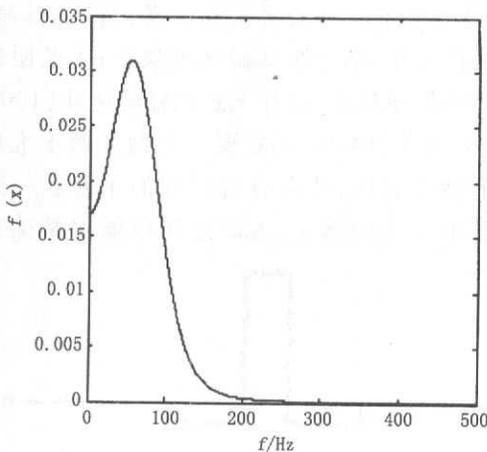


图6 模型频域曲线
Fig.6 The model's response in Frequency Domain



图7 原图
Fig.7 Original image

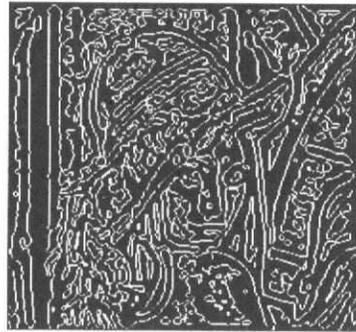


图8 零交叉检测边缘图
Fig.8 Result image using Zero-Cross operator

出的双高斯差模型(DOG 模型)到 90 年代汪云九等提出的广义 Cabor 函数模型,不少学者进行模拟研究,为丰富和深化视觉理论做出了自身的贡献.但每种模型难免有所局限,因此新模型的提出和模拟一直在不停的进行之中.

根据生物视觉 Off 型感受野的性质,本文给出了对 Off 型感受野数学模型的公理化定义:1)内圆为抑制区,圆中心达到最大抑制并向四周递减;2)两侧为兴奋区,类似高斯型分布,一侧向抑制区平滑过渡,一侧向远离中心处递减;3)感受野抑制区和兴奋区具有大小可调性;4)具有空间频率的多通道性质;5)时域上尺度可调性质.

满足以上 5 个条件下,本文提出下面的 off 感受野数学模型:

$$g(x,y) = (a\sqrt{x^2+y^2} - b) \exp(-\frac{x^2+y^2}{c}). \quad (6)$$

为便于分析讨论其对应的一维函数有

$$g(x) = (a|x| - b) \exp(-x^2/c). \quad (7)$$

取值 $a = 1.6, b = 1.12, c = 1$ 的时域特性如图 5、6 所示.时域上可以看到本模型介于 LOG 函数模型和非线性模型之间,频域上具有带通滤波的性质,这一点



图9 本文算法下 leana 边缘图

Fig.9 Edge-Detecting result in new method

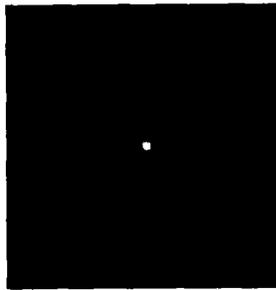


图10 某型直升机红外原图

Fig.10 Infrared original image

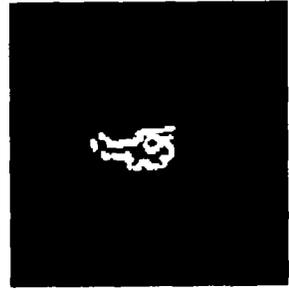


图11 本文算法下边缘图

Fig.11 Corresponding edge

符合目前研究的成果^[8],通过调节 a 、 b 、 c 值可以得到不同的时域、频域响应和滤波效果,他代表了处于视网膜不同位置的视神经细胞感受野的不同形式,这和目前对视觉的理解和认识是一致的。

3 感受野模型在边缘提取中的应用

在讨论模型科学性的同时,我们还考虑模型在图像处理中的应用。目前虽然出现了很多边缘提取的算子,如[Canny 1983,1986],[Shen 1985,1992],[Deriche 1987],[Sarkar 1991],[Ma 1995]分别提出了边缘抽取的最优滤波器,极大丰富了图像处理理论,但是所提出最优滤波器面对实际问题并不是万能的,因为最优滤波器的基础在于边缘为简单阶跃,噪声是可加性白噪声模型。实际中的边缘种类和噪声形式根据不同的图片差别很大,而且上述的理论是基于连续信号提出的,而实际应用于数字化图像还要碰到具体的离散化,比如采样间隔、尺度大小都要经过试验进行确定,其他一些比如小波、sobel等模板都含有一个阈值问题,虽近来还出现了基于模糊熵等自动寻阈值的方法,但缺点也很突出,运算量太大,难以满足快速要求的应用场合。

类比“墨西哥帽算子”,可以预见 Off 型感受野模型使边缘亮边呈现负值,而暗边呈现为正值,基于这一点本文提出以“0”作为二值化的阈值,而不是 Log 算子对过零点检取,因为过零点检取需要大量的逻辑判断工作,既浪费了时间又难以保证边缘的正确性(见图 7,8)。过零点检测明显是不符合军事上运算快速度、目标几何结构突出的要求。本文针对军事红外图像,根据基于对象(object-oriented)的图

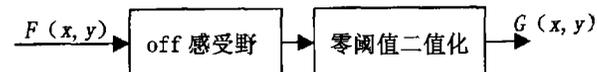


图12 基于 Off 感受野的边缘检测流程

Fig.12 Edge-Detecting flow chart based on Off-Center RF



图13 某型坦克红外原图

Fig.13 Infrared original Image

像处理思路,以 Off 感受野模型为基础提出零阈值判别,边缘提取上检取 >0 的值,即边缘靠近暗区,由于红外图像中目标的温度一般高于背景,所以如此的边缘提取无疑等于放大了目标的轮廓,虽然会有边缘的定位不够准确,但不影响目标的几何特征,这一点有利于接下来的目标识别工作。

对上面的模型采样,得到卷积数学模板,通过一定的学习得到 a 、 b 、 c 值并进行如图 12 所示的运算处理。应用图像如图 9,10,11 所示。上述应用参数为 $a = 1.6$, $b = 1.12$, $c = 1$,采样间隔为 0.6,模板大小为 11×11 。

对于比较复杂的图像,比如地面场景,可以通过减小 a 值,从而增大平滑度的办法进行处理,比如图 13 某型坦克图像,取 $a = 1.45$ 其他参数不变,处理结果如图 14 所示。

4 结论

本文从视觉的感受野机理出发,说明了 On 型感受野和 Hartline 发现的侧抑制理论是一致的,并结合前人的假说提出了 Off 型、On 型感受野交替工



图14 边缘提取图

Fig.14 corresponding edge

作的机制,并给出了 Off 型感受野的视觉模型. 结合军事红外图像处理的要求,从学习和基于对象的思路出发,探索了 Off 感受野模型的应用,取得了良好的结果.

REFERENCES

- [1] Hartline HK. The response of single optic nerve fibers of the vertebrate eye to illumination of the retina. *American Journal of Physiology*, 1938, **121**: 400—415
- [2] Kuffler S W. Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. *Journal of Neurophys.*, 1953, **16**(1): 37—68
- [3] WANG Guang-Yu, LIN Shu-Huang, LU Tao, *et al.* The simulation of some characteristics of two kind of the visual receptive fields based on the bacteriorhodopsin langmuir-blodgett films. *Acta Biophysica Sinica* (王光毓,林书煌,卢涛,等. 以菌紫质 LB 膜为基础的两种视觉感受野的某些特性的模拟. *生物物理学报*), 1996, **12**(1): 97—102
- [4] YANG Jian-Hua, LU Tao, JIANG Long, *et al.* The edge-detecting system of image based on the artificial receptive field implemented by the bacteriorhodopsin langmuir-blodgett films. *Acta Biophysica Sinica* (杨俭华,卢涛,江龙,等. 以菌紫质膜人工感受野为基础的图像边缘检测系统. *生物物理学报*), 1996, **12**(4): 670—674
- [5] GU Fan-Ji, WANG Yun-Jiu. *The Information Processing in Inhibition Neural Net.* Beijing: The Science Press (顾凡及,汪云久. *侧抑制网络中的信息处理*. 北京:科学出版社), 1983
- [6] GAO Wen, CHEN Xi-Lin. *Computer Vision Arithmetic and System Analysis.* Beijing: Tsinghua university Press (高文,陈熙霖. *计算机视觉-算法与系统分析*. 北京:清华大学出版社), 2000
- [7] Rodieck R W, Stone J. Analysis of receptive fields of cat retinal ganglion cells. *J Neurophysiol*, 1965, **28**: 833—849
- [8] ZHOU Yan, JIN Wei-Qi. The transfer characteristic of human visual system and models. *Optical Technique* (周燕,金伟其. 人眼视觉的传递特性及模型. *光学技术*), 2002, **28**(1): 57—62