

仿视皮层 V1 特性的 SAR 图像边缘检测

辛 鹏， 许悦雷， 马时平， 邹洪中， 张文达， 李 帅， 吕 超
(空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要 合成孔径雷达(SAR)图像的边缘检测是图像处理领域的热门研究课题,针对传统方法对噪声敏感、受内部纹理干扰等严重问题,借鉴人类视觉系统中初级视皮层(V1)神经细胞的感受野特性及该区域带有非经典感受野的细胞对同质区域纹理和噪声的环绕抑制机制,提出一种仿视皮层信息处理机制的 SAR 图像的边缘检测方法。采用 Gabor 滤波器经奇偶分解、汇聚、归一化等操作模拟 V1 区感受野特性,再引入模拟非经典感受野环绕抑制机制的环绕抑制项以对同质区域的纹理和噪声进行抑制,保留感兴趣的边缘信息。仿真结果表明,所提方法能抑制文中 4 类不同的 SAR 图像同质区域的大部分纹理,在一定程度上弱化斑点噪声,取得了比 canny 算子更好的边缘检测效果。提出的新方法可以应用于 SAR 图像的边缘检测。

关键词 SAR 图像;边缘检测;初级视皮层;感受野;Gabor 滤波器;环绕抑制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.009

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0049-05

A Method of SAR Image Edge Detection by Modeling the Properties of V1 in Cortex

XIN Peng, XU Yuelei, MA Shiping, ZOU Hongzhong, ZHANG Wenda, LI Shuai, LYU Chao
(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University,
Xi'an 710038, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar(SAR)image edge detection is a hot issue in the field of image processing. It is difficult to eliminate the noise and internal texture of SAR image by traditional methods. By making use of the properties of the receptive field and the surround suppression mechanism to texture and noise in the homogeneous region in cells with non-classical receptive field in Primary Visual Cortex (V1) in human visual system, this paper proposes a new method of SAR image edge detection by modeling the information processing mechanism of V1 Through the operations of odd and even decomposition, spatial summation and normalization by Gabor filter, the paper simulates the properties of the classical receptive field. A series of computational steps motivated by surround suppression mechanism are added to suppress the texture and noise in homogeneous region and preserve the contour wanted. The simulation results show that the proposed method can suppress most texture in the homogeneous region of the four kinds of SAR images used in the article, can weaken speckle noise to some degree, and edge detection effect is better than

收稿日期:2016-12-05
基金项目:国家自然科学基金(61472441)
作者简介:辛 鹏(1993—),男,山东潍坊人,硕士生,主要模式识别与人工智能研究. E-mail:wszxxmx@163.com

引用格式:辛鹏,许悦雷,马时平,等. 仿视皮层 V1 特性的 SAR 图像边缘检测[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):49-53. XIN Peng,XU Yuelei,MA Shiping,et al. A Method of SAR Image Edge Detection by Modeling the Properties of V1 in Cortex[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2017,18(2):49-53.

that of the canny detector. The method can be applied to the edge detection of SAR images.

Key words: SAR image; edge detection; Primary Visual Cortex; receptive field; Gabor filter; surround suppression

SAR 是一种主动式微波成像传感器,利用脉冲压缩技术提高距离分辨率,利用合成孔径技术提高方位分辨率^[1]。SAR 成像不依赖于光照,而是靠自己发射的微波,故具有一定的穿透能力,能穿过云、雨、雾、烟等,也对金属、地貌等有较强的探测能力。随着 SAR 在军事、民用的领域的飞速发展,人们不再仅仅满足于从 SAR 图像中获取位置、轨迹等信息,也希望获取目标的形状、体积等物理信息。SAR 图像中每一点的灰度值由照射到物体后反射的回波叠加得到,相邻灰度值受到雷达相干性的影响产生随机变化,表现为图像中出现乘性斑点噪声^[2]。如何在提取 SAR 图像边缘的同时有效的抑制斑点噪声和纹理,是该研究领域需要解决的关键问题。

早期应用到 SAR 图像边缘检测的传统边缘检测算子如 Sobel 算子和 Canny 算子等能起到一定效果,但对噪声敏感,实用性较差。针对 SAR 图像成像产生乘性斑点噪声这一特性,涌现出了一系列 SAR 图像边缘检测方法。目前已提出的 SAR 图像边缘检测方法主要分 4 类:基于单边缘模型的方法、基于多边缘模型的方法、多分辨率的方法及其它跨学科的新方法^[3]。第 1 类方法主要有基于局部均值差异的方法^[4]和假设检验的方法^[5]等;第 2 类方法主要有指数均值比方法^[6]等线性滤波器方法;第 3 类主要有多分辨率广义似然比(Generalized Likelihood Ratio, GLR)边缘检测方法^[7]和基于小波分析^[8-9]等方法;第 4 类有贝叶斯检测方法^[10-11]、基于神经网络的方法^[12]和混合遗传算法^[13]等。这些算法都有其特定的优势,也有其局限性,要么对纹理、噪声抑制不够;要么对不同种类、不同分辨率的 SAR 图像普适性不强;要么计算过于复杂,效率较低,无法像人类视觉系统一样快速、准确、完整地提取感兴趣的边缘信息。

人类视觉具有快速、准确提取边缘信息、排除噪声干扰的功能,模拟人类视觉的信息处理机制可以有效提高 SAR 图像边缘检测的准确度和效率。本文所提方法正是基于人脑视皮层的信息处理机制,用 Gabor 滤波器经汇聚、归一化等操作模拟 V1 区细胞感受野特性,再引入非经典感受野的环绕抑制项,以弱化 SAR 图像中的纹理、斑点噪声,保留边缘,实现较好的 SAR 图像边缘检测效果。

1 仿视皮层 V1 特性的边缘检测

1.1 V1 区感受野特性

视觉系统中每个视觉细胞都对视网膜内某个限定区域内的光刺激产生响应,该区域称为视觉感受野或经典感受野^[14]。20 世纪 70 年代初,研究者发现,经典感受野之外的广阔区域,虽然给予单独的光刺激时不能引起细胞的响应,却能影响经典感受野的响应强度,该区域被称为非经典感受野或整合野^[14]。带有非经典感受野抑制的细胞对独立的线型、条状刺激响应最强,而有相似类型(方位、朝向相似)的刺激位于其附近时,响应被削弱,生物学家将这种作用称为非经典感受野抑制,即环绕抑制或周边抑制。生物学家还发现了一种比较极端的神经元细胞^[15],这种细胞仅对单个的线型、条状刺激有响应,当相同类型的该类刺激数量增加时,细胞无响应。另外,研究发现,这种抑制作用也存在于许多动物的视网膜神经节细胞、侧膝体神经元及不同的皮层区域中,如 V1、MT(Middle Temporal)、MST(Medial Superior Temporal)等^[16]。本文所提方法就是模仿这一特性来实现对 SAR 图像同质区域(具有相同质地属性的区域)纹理、噪声的抑制。图 1 为本文方法对规则的光栅、栅格纹理的响应图。

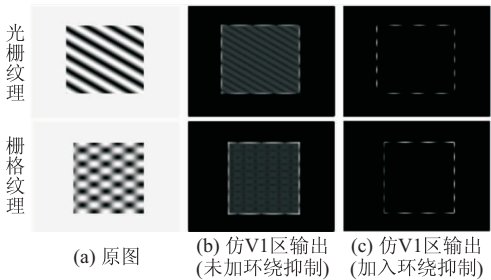


图 1 本文方法对规则的光栅、栅格纹理的响应图

Fig. 1 Output images of this method to regular grating and plaid texture

由图 1(b)可以看出,经过仿 V1 区(不加环绕抑制)处理后,光栅和栅格纹理,以及轮廓边缘都被很好地检测出来;从图 1(c)可看出,进一步加入环绕抑制后,纹理被抑制,轮廓的边缘被较好地保留下来。这说明所提方法对同质区域的纹理、噪声有很好的抑制作用,可以应用于边缘检测。

1.2 视皮层 V1 区模型

目前研究人员大多用 Gabor 滤波器来模拟 V1 区简单细胞的感受野特性^[17]。本文应用的 Gabor 滤波器在空间域内将 Gabor 复指数函数按正余弦展开后分解为奇滤波器和偶滤波器,分别进行滤波运算,最后将奇、偶滤波输出的平方和经过归一化处理作为 V1 区的最终输出^[18]。

定义输入的图像为 $\mathbf{I}(x, y)$, 其中 (x, y) 代表像素点的位置, 滤波器表达式为:

$$H(x, y, \theta, f_s) = B e^{-\langle x^2 + y^2 \rangle / 2\sigma^2} e^{j2\pi \langle f_s \cos \theta \rangle x + f_s \sin \theta y} \quad (1)$$

式中: σ 为高斯函数的标准差, 调节空间范围的大小; θ 为简单细胞的偏好方向; f_s 为感受野的空间频率; B 是由 σ 确定的系数, 在本文中其值为 $1/(2\pi\sigma^2)$ 。

假设分解后的空间滤波器的实部与虚部分别为 $\mathbf{H}_e$ 和 $\mathbf{H}_o$, 则奇偶滤波器分别为:

$$\mathbf{G}_o(x, y, \theta, f_s) = \mathbf{H}_o(x, y, \theta, f_s) \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_e(x, y, \theta, f_s) = \mathbf{H}_e(x, y, \theta, f_s) \quad (3)$$

以上的奇偶滤波器能够模拟 V1 区简单细胞感受野的特性, 则偏好方向为 θ 、偏好空间频率为 f_s 的简单细胞的奇偶响应分别为:

$$\mathbf{R}_o(x, y, \theta, f_s) = \mathbf{G}_o(x, y, \theta, f_s) * \mathbf{I}(x, y) \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_e(x, y, \theta, f_s) = \mathbf{G}_e(x, y, \theta, f_s) * \mathbf{I}(x, y) \quad (5)$$

复杂细胞响应由简单细胞响应汇聚得到, 本文定义为简单细胞奇偶响应的能量和, 具体见式(6):

$$\mathbf{E}(x, y, \theta, f_s) = \mathbf{R}_o(x, y, \theta, f_s)^2 + \mathbf{R}_e(x, y, \theta, f_s)^2 \quad (6)$$

假定有 N 个空间滤波器, 代表偏好方向在空间均匀分布的 N 个简单细胞, 即 $\theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$, 归一化处理后得到最终 V1 细胞的输出, 如式(7)所示:

$$\mathbf{E}^{V1}(x, y, \theta, f_s) = \frac{\mathbf{E}(x, y, \theta, f_s)}{\sum_{i=1}^N \mathbf{E}(x, y, \theta, f_s) + \epsilon} \quad (7)$$

式中: $0 < \epsilon < 1$, 为一个较小的常量, 以避免式(7)中分母为 0。

1.3 环绕抑制项的加入

本文提出的环绕抑制项^[19]是通过与 Gabor 核函数结合实现的, 细节如下:

首先定义一个以 Gabor 核函数表示的抑制范围函数, 即用 2 个高斯函数的差值表示非经典感受野的环形范围, 其位于经典感受野的部分值为 0, 经典感受野之外的区域值为正且随着与中心距离的增大而衰减, 具体见式(8):

$$\mathbf{I}_{k1, k2}(x, y, \theta, f_s) = |\mathbf{G}_{k2}(x, y, \theta, f_s) - \mathbf{G}_{k1}(x, y, \theta, f_s)|^+ \quad (8)$$

式中: $\mathbf{G}_k(p, t, \theta, v_c)$ 是去掉载波的 Gabor 核函数; k 是调节非经典感受野范围的参数, 具体见式(9):

$$\mathbf{G}_k(x, y, \theta, f_s) = B e^{-\langle x^2 + y^2 \rangle / 2(k\sigma)^2} \quad (9)$$

式中: $|\cdot|^+$ 表示半波整流, 它保证抑制作用仅仅发

生在定义的区域, 公式如下:

$$|z|^+ = \begin{cases} z, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} \quad (10)$$

定义距离加权函数为 $\omega(x, y, \theta, f_s)$, 由式(8)的归一化决定:

$$\omega(x, y, \theta, f_s) = \frac{\mathbf{I}_{k1, k2}(x, y, \theta, f_s)}{\|\mathbf{I}_{k1, k2}(x, y, \theta, f_s)\|_1} \quad (11)$$

式中: $\|\cdot\|_1$ 代表 L-1 范数。

接着用式(12)模拟空间任意一点 (x, y) 的环绕抑制能量, 其值为 V1 区输出与距离加权函数的卷积:

$$\mathbf{S}(x, y, \theta, f_s) = \mathbf{E}^{V1}(x, y, \theta, f_s) * \omega(x, y, \theta, f_s) \quad (12)$$

图像经过环绕抑制处理后的最终输出结果为:

$$\mathbf{E}^{V1}(x, y, \theta, f_s) = |\mathbf{E}^{V1}(x, y, \theta, f_s) - \alpha \mathbf{S}(x, y, \theta, f_s)|^+ \quad (13)$$

本文以 Matlab 2014b 作为仿真平台, 使用村庄、河流、高速公路、海峡 4 种 SAR 图像进行边缘检测的仿真实验, 滤波器参数 σ, f_s 借鉴文献[18]基于控制变量法由实验统计得到: $f_s = 0.26, \sigma = 1.2 \sqrt{\log 2 / (\pi / f_s / 3)} \approx 2.59$ 。

2 实验结果和分析

2.1 SAR 图像的边缘检测实验 1

2.1.1 村庄 SAR 图像的边缘检测

为初步验证本文所提方法的可行性, 选取经典的 canny 算子作为比较算法, 选取 1 副分辨率较低的村庄 SAR 图像作为输入, 分别进行 Gabor 滤波, 再加入环绕抑制, 仿真结果见图 2。

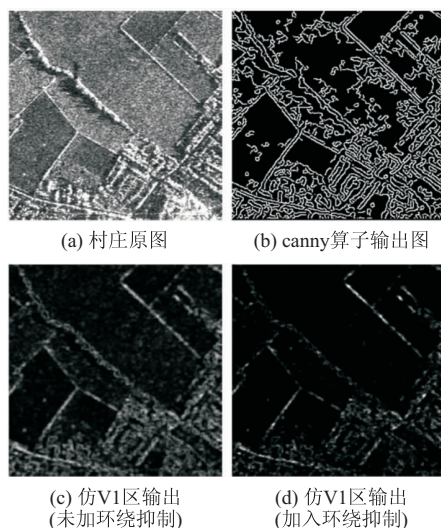


图 2 村庄 SAR 图像的边缘检测结果

Fig. 2 Edge detection output images of a village SAR image

由图 2(c) 发现, 原图像经过仿 V1 区(不加环绕抑制)处理后较完整地保留了边缘信息, 但纹理同样

被保留了下来;比较图 2(b)、(d)发现,所提方法抑制了大部分纹理,一定程度上弱化了 SAR 图像的斑点噪声,取得了比 canny 算子更好的 SAR 图像边缘检测效果。这是因为本文所提方法对村庄 SAR 图像中同质区域的纹理和噪声有良好的抑制作用。

2.1.2 参数选择对检测结果的影响

在应用本文方法进行村庄 SAR 图像边缘检测的仿真实验过程中,通过改变滤波器的滤波窗口尺寸、滤波器数量(偏好方向从 0 到 2π 均匀分布)、环绕抑制权重系数 α 来分析不同参数村庄 SAR 图像的边缘检测效果,并确定出最优参数组合。参数 k_1, k_2 参考文献[20]设置为 $k_1=1, k_2=4$ 。以图2(a)的村庄 SAR 图像作为输入,运用控制变量法分别改变以上 3 个参数的值(其余参数固定不变),实验结果见图 3,由于篇幅限制图中每类参数只给出了 3 组典型值的边缘检测结果。

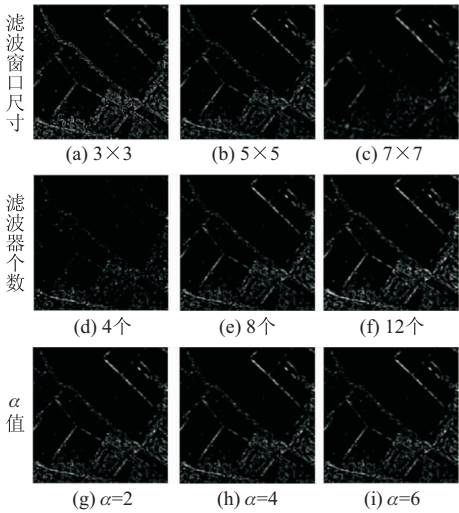


图 3 不同参数条件下的边缘检测结果
Fig. 3 Edge detection output images under different parameters

由图 3(a)~(c)可以发现,滤波窗口尺寸的增加能一定程度的提高边缘检测的效果,但当大于某个尺寸阈值(本例图像为 5×5)后,效果的优化不再明显,甚至会略微变差,而且窗口尺寸越大,计算量越大,程序运行所需时间也越长;由图 3(d)~(f)可以发现,滤波器的数量很少时,边缘信息获取不足,效果较差,滤波器的数量增加,边缘慢慢丰满,但纹理和噪声等也随之增加。且滤波器数量越多,计算量越大,程序运行效率越低。比较发现,当使用 8 个滤波器时能平衡边缘信息和干扰信息,取得最佳的检测效果;比较图 3(g)~(i)发现,环绕抑制能量权重系数 α 值增大后,抑制作用增强,但同时局部边缘丢失也更加明显,兼顾两方面我们选择 $\alpha=2$ 。综上分析,本文模型在滤波窗口尺寸为 5×5 ,滤波器数量为 8 个, $\alpha=2$ 时可以对村庄 SAR 图像取得较好的边缘检测效果。

2.2 SAR 图像的边缘检测实验 2

为进一步验证本文所提方法对 SAR 图像的边缘检测能力,在第 2.1.2 节中分析确定的最优组合参数的条件下,选取 3 幅高分辨率的河流、高速公路、海峡 SAR 图像(分辨率由低到高)作为输入,获得相应的仿 V1 区(不加环绕抑制)处理后输出和进一步加入环绕抑制后的输出。仍然选取 canny 算子作为对比算法,仿真结果见图 4。

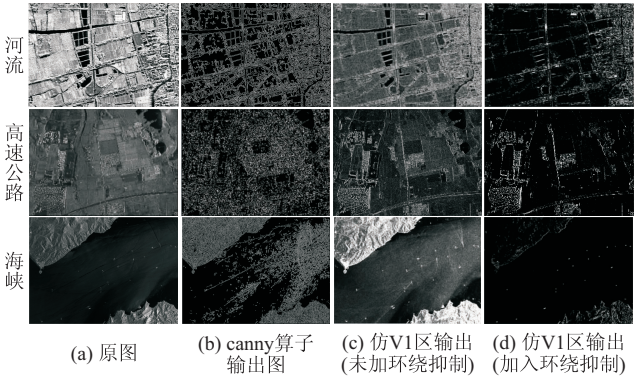


图 4 河流、高速公路、海峡 SAR 图像的边缘检测仿真输出
Fig. 4 Edge detection output images of rivers, highways and strait

比较图 4(c)、(d)两列发现,经过仿 V1 区(不加环绕抑制)处理后输出结果比较粗糙,纹理信息丰富且存在斑点噪声,进一步加入环绕抑制后,大部分纹理信息被抑制,斑点噪声也得到了一定程度的弱化;比较图 4(b)、(d)两列发现,对于图 4(a)中 3 幅高分辨率的 SAR 图像,canny 算子的输出图纹理十分丰富,基本无法区分我们想要的边缘和纹理、噪声,边缘检测效果很差,而本文方法则能抑制大部分的纹理、噪声,保留边缘信息,取得较好的边缘检测效果;从河流、高速公路、海峡 SAR 图像的环绕抑制仿真结果可以看出,本文所提方法对不同类型的高分辨率 SAR 图像均有良好的边缘检测效果,具有一定的普适性,是生物视觉模型在 SAR 图像处理领域的积极探索。

3 结语

为促进计算机视觉与生物视觉的融合发展,使得计算机视觉具备生物视觉的鲁棒性及准确性,本文提出了一种仿视皮层 V1 特性的边缘检测方法。该方法以 Gabor 滤波器模拟视皮层 V1 区细胞感受野特性,引入模拟非经典感受野的环绕抑制项以弱化 SAR 图像同质区域的纹理和斑点噪声,保留边缘,取得了良好的边缘检测效果。首先以规则的纹理图作为输入,验证了本文方法应用于边缘检测的可行性;然后以一幅村庄 SAR 图像作为输入,与 canny 算子

比较取得了更好的边缘检测效果,随后分析了3种主要参数对实验结果的影响,确定了最优参数组合;最后以河流、高速公路、海峡的高分辨率SAR图像作为输入,验证了所提方法对不同SAR图像的边缘检测能力。从实验结果看,本文方法在抑制纹理和降低斑点噪声的基础上很好地保持了SAR图像边缘,有效提取了SAR目标区域的边缘轮廓,为下一步SAR图像目标的分类和识别打下基础。

参考文献(References):

- [1] 宋建社,郑永安,袁礼海.合成孔径雷达图像理解与应用[M].北京:科学出版社,2008.
SONG J S, ZHENG Y A, YUAN L H. Comprehension and Application of Synthetic Aperture Radar Images [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 尹奎英,金林,李成,等.融合目标轮廓和阴影轮廓的SAR图像目标识别[J].空军工程大学学报(自然科学版),2011,12(1):24-28.
YIN K Y, JIN L, LI C, et al. An SAR ATR Based on Fusion of Target Contour and Shadow Contour[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(1): 24-28. (in Chinese)
- [3] 赵凌君,贾承丽,匡纲要.SAR图像边缘检测方法综述[J].中国图象图形学报,2007,12(12):2042-2049.
ZHAO L J, JIA C L, KUANG G Y. Overview of Edge Detection in SAR Images [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2042-2049. (in Chinese)
- [4] ZAMAN M R, MOLONEY C R. A comparison of Adaptive Filters for Edge-preserving Smoothing of Speckle Noise[C]//ICASSP-93. IEEE, 1993: 77-80.
- [5] OLIVER C J, BLACKNELL D, WHITE R G. Optimum Edge Detection in SAR[J]. IEE Proceedings -Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(1): 31-40.
- [6] FJORTOFT R, LOPES A, MARTHON P, et al. An Optimal Multiedge Detector for SAR Image Segmentation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 793-802.
- [7] FJORTOFT R, LOPES A, MARTHON P, et al. Different Approaches to Multiedge Detection in SAR Images [C]//IGARSS'97 IEEE. 1997: 2060-2062.
- [8] DAI M, PENG C, CHAN A K, et al. Bayesian Wavelet Shrinkage with Edge Detection for SAR Image Despeckling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642-1648.
- [9] JIN R, YIN J, ZHOU W, et al. Edge Detection in Polarimetric SAR Images Based on the Nonsampled Contourlet Transform [C]//2015 IEEE Radar Conference. IEEE, 2015: 0319-0323.
- [10] BANDIERA F, MASCIULLO A, RICCI G. A Bayesian Approach to Oil Slicks Edge Detection Based on SAR Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2901-2909.
- [11] HAZARIKA D, NATH V K, BHUYAN M. SAR Image Despeckling Based on a Mixture of Gaussian Distributions with Local Parameters and Multiscale Edge Detection in Lapped Transform Domain[J]. Sensing and Imaging, 2016, 17(1): 15.
- [12] DIMOU A, JAGER G, FRANGOS P. Adaptive Edge Enhancement in SAR Images Training on the Data vs Training on Simulated Data[C]//International Conference on Image Processing. 2001:493-496.
- [13] YANG S Y, WANG M, JIAO L C. A Genetic Algorithm-based Edge Detection Method for SAR Image[J]. Infrared Technology, 2005, 27(1): 503-506.
- [14] 寿天德.视觉信息处理的脑机制[M].2版.合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
SHOU T D. Brain Mechanisms of Visual Information Processing[M]. 2ed. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [15] VON der H R, PETERHANS E, DURSTELER M R. Periodic-Pattern-Selective Cells in Monkey Visual Cortex [J]. The Journal of Neuroscience, 1992, 12(4): 1416-1434.
- [16] TSUI J M G, HUNTER J N, BORN R T, et al. The Role of V1 Surround Suppression in MT Motion Integration[J]. Journal of Neurophysiology, 2010, 103(6): 3123-3138.
- [17] GRIGORESCU C, PETKOV N, WESTENBERG M A. Contour Detection Based on Nonclassical Receptive Field Inhibition[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(7): 729-739.
- [18] SOLARI F, CHESSA M, MEDATHATI N V K, et al. What Can We Expect from a V1-MT Feedforward Architecture for Optical Flow Estimation? [J]. Signal Processing: Image Communication, 2015, 39: 342-354.
- [19] PETKOV N, SUBRAMANIAN E. Motion Detection, Noise Reduction, Texture Suppression, and Contour Enhancement by Spatiotemporal Gabor Filters with Surround Inhibition[J]. Biological Cybernetics, 2007, 97(5-6): 423-439.
- [20] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(6): 679-698.

(编辑:徐楠楠)