

DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2018.05.011

结合对比度适应与侧抑制信息关联的轮廓检测方法

蒋 涯, 武 薇*, 范影乐

(杭州电子科技大学模式识别与图像处理实验室, 浙江杭州 310018)

摘要: 目的 基于视通路中广泛存在的对比度适应特性, 结合侧抑制信息关联机制, 提出了一种图像轮廓检测的新方法。方法 根据对比度敏感的神经元响应和初级视皮层的方向选择特性, 构建对比度适应、方向敏感的感受野, 检测视觉信息中的差异性并将视觉信息映射携带有轮廓强度信息的感受野响应; 建立 LGN 与 V1 侧抑制信息关联机制的数学模型, 并计算 LGN 非经典感受野与经典感受野视觉输入的差异性, 对 V1 非经典感受野的侧抑制强度进行全局调控, 实现对无关纹理信息的抑制。结果 以 RuG 图库的图像作为本文的实验对象, 由检测结果可见, 与人工基准图的平均 P 指标为 0.48, 凸显出本文算法保护真实轮廓、抑制纹理噪声的优越性能。结论 本文结合对比度适应与侧抑制关联机制实现了对图像显著轮廓的检测, 为后续的高级皮层的视觉认知任务提供了一种新思路。

关键词: 轮廓检测; 方向选择性; 侧抑制信息关联; 对比度适应

中图分类号: R319 文献标识码: A 文章编号: 1002-0837(2018)05-0551-08

A Contour Detection Method with Combined Contrast Adaptation and Relevant Surround Inhibition. Jiang Ya, Wu Wei, Fan Yingle. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(5): 551-558

Abstract: **Objective** Based on the widely existing contrast adaptation mechanism in the visual pathway and the relevant surround inhibition mechanism, a new method of image contour detection was proposed. **Methods** According to the contrast-sensitive neuronal response and the Direction Selectivity in the Primary Visual Cortex, a contrast-adaptive, direction-sensitive receptive field was constructed, the differences in visual information were detected, and the visual information was mapped to the receptive field response with contour intensity information. The mathematical model of the relevant surround inhibition mechanism between LGN and V1 was established. The difference between the LGN non-classical receptive field and the classical receptive field visual input was calculated to control the surround inhibition intensity of the V1 non-classical receptive field globally, and the suppression of the extraneous texture information was achieved. **Results** Taking the image of RuG dataset as the experimental object of this paper, we could observe from the test results that the average P index with the ground truth was 0.48, which highlighted the superior performance of the algorithm in protecting the true contour and suppressing the texture noise. **Conclusion** This paper combines the contrast and relevant surround inhibition mechanism to achieve the detection of significant contours of the image and provides a new idea for the subsequent visual cortical tasks of the advanced cortex.

Key words: contour detection; direction selectivity; relevant surround inhibition; contrast adaptation

Address correspondence and reprint requests to: Wu Wei. Laboratory of Pattern Recognition and Image Processing, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang Hangzhou 310018, China

轮廓检测是图像理解或是视觉目标分析重要的基础部分。轮廓检测提取的轮廓特征是环境中最为关键的视觉信息之一。如何去除伪轮廓和纹理噪声的同时减少漏检率, 以及对主体轮廓的增强是轮廓检测任务两个基本的要求。

传统的边缘检测方法, 例如基于数学模型描述局部像素在特定方向上的灰度变化的 Canny、

Sobel 等算子^[1-2], 虽然在计算上简洁并快速, 但无法有效突出目标主体轮廓, 并对背景纹理边缘进行抑制, 存在大量伪轮廓。在后续的研究中陆续提出了多尺度^[3-4]、多特征^[5]、上下文分析^[6]等检测方法, 例如杨柳等^[7]提出的平均曲率流活动轮廓模型, 沈嘉琳等^[8]基于灰度阈值分割和动态规划提取边缘, 虽然这些方法能提高轮廓的检测率,

收稿日期: 2018-04-10 修回日期: 2018-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501154)

第一作者: 蒋 涯, 男, 硕士研究生, 研究方向为模式识别与图像处理。E-mail: maniadouya@163.com

* 通讯作者: 武 薇, 女, 博士, 讲师, 研究方向为神经信息学、机器视觉与机器认知。E-mail: ww@hdu.edu.cn

但这些方法计算性能仍有不足。考虑到人眼能够高效而快速地提取图像轮廓特征,人们开始意识到视觉机制处理信息的方式对轮廓检测重要的启示意义。例如有研究利用 Gabor 模型对神经节细胞的方向选择性进行模拟,另外还有研究在此基础上利用二维 Gabor 函数模拟初级视皮层经典感受野的方向选择性,并通过非经典感受野的侧抑制机制对经典感受野的响应进行抑制,有效去除了背景纹理^[9]。在这个基础上,后续的研究又提出了不少改进后的方法。桑农等^[10]提出的蝶形抑制模板,通过对非经典感受野抑制域的改进有效的提高了轮廓检测的效果;片兆宇等^[11]通过构造邻域影响因子,模拟细胞感受野中心神经元与邻域神经元的相互作用,在增强轮廓和纹理抑制之间找到了较好的平衡;廖进文等^[12]采用次序编码处理视觉输入,满足轮廓感知的快速性需求;Yang 等^[13]利用颜色拮抗特性对彩色图像进行主体轮廓的提取并用空间稀疏约束除去背景纹理。

虽然上述基于视觉机制的方法相对传统方法能更有效地检测轮廓,但上述方法都没有关注感受野的对比度适应机制以及视通路中侧抑制信息的关联性,其中对比度适应机制让神经元更有效编码视觉信息,而侧抑制信息关联机制能更好地保护真实轮廓,抑制纹理噪声。本文提出一种结合了对比度适应机制和侧抑制信息关联的轮廓检测新方法,通过模拟神经元细胞的对比度适应机制调节经典感受野的响应,并研究了初级视皮层与外膝体两者侧抑制机制的相互联系,构建一种侧抑制信息关联模型,结合初级视皮层侧抑制实现了对背景纹理的抑制,最后经非极大值抑制和滞后阈值处理,得到最终轮廓图。

1 方法

1.1 感受野的对比度适应机制

神经生理学表明,初级视皮层感受野的响应强度与视觉输入的对比度刺激呈现类似 S 型曲线的对应关系,表现出一种感受野的对比度适应机制^[14](图 1)。通常情形下,自然图像中不同目标的对比度分布存在明显的差异,对比度适应机制将使感受野能够进行有效的自我调节,从而适应不同对比度分布的视觉检测任务,由于对比度特征是图像边缘和轮廓等关键信息的一种表征形式,因此本文利用对比度敏感的神经元响应,构建对比度适应的感受野模型,检测视觉信息中的差异性,最终将视觉激励映射成携带有轮廓信息的感受野响应,实现视觉信息的有效编码。

本文在引入对比度适应机制的同时,综合考虑了对比度强度范围和极端对比度对神经敏感性的影响,后者具体表现为在对比度弱的时候提高神经元活动的敏感度以增强信噪比,在对比度强的时候降低神经元活动的敏感度,以避免反映饱和和导致的信息丢失^[15]。以感受野响应强度来表达神经元敏感度的变化,引入修正的 *sigmoid* 函数描述对比度适应机制下的感受野响应强度变化曲线,如式(1)所示。

$$s(t) = 1 / (1 - e^{-\lambda(t-\tau)}) \quad (1)$$

通过控制函数陡峭程度的参数 λ 和水平位置的参数 τ 描述曲线变化,定义对比度适应机制对感受野神经元响应强度的调节参数 W_{con} 如式(2)所示。

$$W_{con}(x, y) = s(C(x, y)) \quad (2)$$

其中 $C(x, y)$ 为局部对比度,在计算对比度特征的

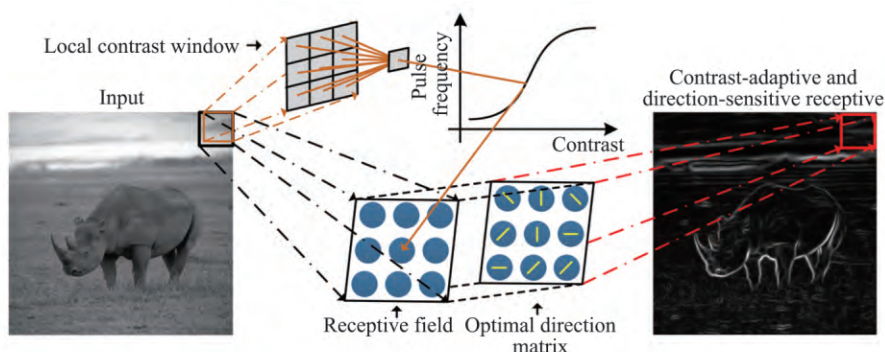


图 1 对比度适应感受野模型
Fig. 1 Contrast-adaptive receptive field model

同时考虑了自然图像中亮度值大小的随机分布, 以及对比度和亮度之间的空间相关性, 本文使用改进的均方根对比度计算方法^[16], 局部对比度定义如式(3)所示。

$$C(x, y) = \sqrt{\frac{1}{\mu \sum_{(x_i, y_i) \in W_{xy}} w(x_i, y_i)} \frac{(I(x_i, y_i) - L(x, y))^2}{L(x, y)^2}} \quad (3)$$

式中 $I(x_i, y_i)$ 为该点的亮度值 $L(x, y)$ 为窗口内以 $w(x_i, y_i)$ 为权值的加权平均亮度 μ 为窗口内加权后的亮度总和 $w(x_i, y_i)$ 为一个余弦加权的局部窗口, 定义如式(4)所示。

$$w(x_i, y_i) = \frac{1}{2} \left(\cos\left(\frac{\pi}{p} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}\right) + 1 \right) \quad (4)$$

其中 p 为局部窗口半径, (x_i, y_i) 表示为以 (x, y) 为中心的图像窗口中的第 i 个像素。初级视皮层中的神经元细胞能够对特定方向的视觉刺激产生更强烈的反应, 即具有方向选择性^[17]。本文使用能够提取图像多方向信息的二维高斯导函数计算特定位置各方向的响应。

$$e(x, y, \theta) = \left| I(x, y) \cdot \frac{\partial g(\tilde{x}, \tilde{y}, \theta)}{\partial \tilde{x}} \right| \quad \theta = 0, \pi/8, \dots, 7\pi/8 \quad (5)$$

其中 $\tilde{x} = x \cos \theta + y \sin \theta$, $\tilde{y} = -x \sin \theta + y \cos \theta$, 函数 g 是高斯函数。对于特定位置的初级视皮层感受野响应, 本文选取各方向响应的最大值为边界输出, 并用上文得到的 W_{con} 对边界输出进行调节, 得到携带对比度与轮廓强度信息的感受野响应, 如式(6)所示。

$$E(x, y) = W_{con}(x, y) \cdot \max(e(x, y, \theta)) \quad \theta = 0, \pi/8, \dots, 7\pi/8 \quad (6)$$

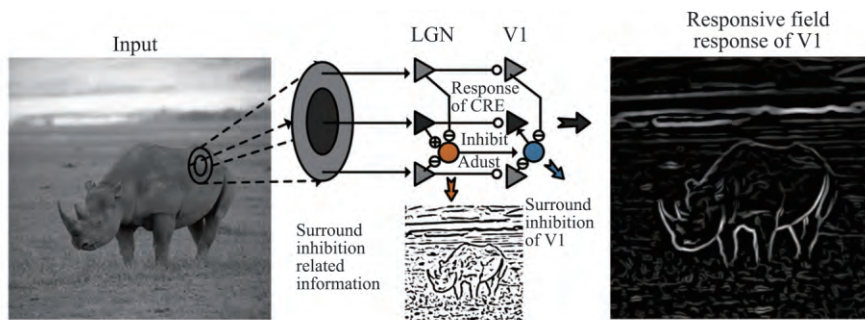


图2 侧抑制信息关联模型
Fig. 2 Relevant surround inhibition mechanism

1.2 侧抑制信息关联机制

初级视皮层非经典感受野的侧抑制作用能够有效去除无关纹理, 区分轮廓和非轮廓的边缘^[18]。在现有的研究中, 往往关注初级皮层非经典感受野侧抑制机制的作用形式, 例如使用初级视皮层非经典感受野的动态特性提取抑制分量来抑制经典感受野的响应^[19], 或者是对初级视皮层非经典感受野的形态进行改进^[20], 没有深入考虑初级视皮层侧抑制的形成机制。

普遍认为视通路中每个组织结构都影响着下游的组织, 初级视皮层的视觉信息绝大部分来自外膝体投射, 两者的关系密不可分^[21]。近年来神经生理学揭示, V1 层的侧抑制机制的可能源自于 LGN 感受野的侧抑制机制^[22]。根据这种机制, 本文提出了一个侧抑制信息关联模型(图2)。具体表现为用外膝体感受野的侧抑制信息调制初级视皮层的侧抑制强度。

外膝体侧抑制机制和初级视皮层侧抑制机制之间存在高度的相似性^[23], 因此本文提出的模型中外膝体与初级视皮层侧抑制强度呈正相关, 表现为在外膝体感受野上受到较强抑制的响应, 在结合外膝体侧抑制信息的初级视皮层感受野上会对该点响应进行较强的抑制; 反之, 则减弱对该点响应的抑制强度。从而减弱轮廓之间的相互抑制, 保护真实轮廓, 对非轮廓的纹理和伪边缘进行有效地去除。

为体现外膝体侧抑制强度信息, 以外膝体非经典感受野与经典感受野视觉输入的差异性作为抑制信息, 同时考虑距离因素对两者视觉输入差异性的量化影响, 分别使用高斯函数和双高斯差函数表示经典感受野和非经典感受野的视觉输

入,并引入局部半波整流进行微调,最终得到外膝体的侧抑制信息。 $\bar{\phi}_c$ 与 $\bar{\phi}_s$ 分别是外膝体经典感受野和非经典感受野的视觉输入。

$$\bar{\phi}_c(x, y) = \sum_{(m, n)} I(x + m, y + n) \cdot g(m, n) \quad (7)$$

$$\bar{\phi}_s(x, y) = \sum_{(m, n)} I(x + m, y + n) \cdot DoG^+(m, n) \quad (8)$$

其中

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

$$DoG^+(x, y) = \max\left\{\frac{1}{2\pi(\rho\sigma)^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2(\rho\sigma)^2}\right) - \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \rho\right\} \quad (10)$$

式中 σ 表示外膝体感受野的大小, ρ 表示非经典感受野与经典感受野的比值。

外膝体侧抑制信息的度量值定义如式(11)所示。

$$\Delta\phi(x, y) = \lambda \cdot \max\{\bar{\phi}_c(x, y) - \bar{\phi}_s(x, y) \rho\} \quad (11)$$

其中 $\lambda = \bar{\phi}_c(x, y) / \bar{\phi}_s(x, y)$ 进一步凸显外膝体经典感受野和非经典感受野输入的差异性,再将得到的侧抑制信息经幂指数归一化得到调节初级视皮层侧抑制强度的参数:

$$W_{LGN}(x, y) = \exp\left(-\frac{\Delta\phi(x, y)^2}{2\delta^2}\right) \quad (12)$$

式中 δ 为侧抑制信息强度调节参数。

1.3 显著轮廓提取

初级视皮层的侧抑制机制能够有效去除无关纹理,考虑到距离因素对侧抑制权重的影响,本文在计算初级视皮层侧抑制强度时使用如式(13)所示的距离权重函数,初级视皮层侧抑制强度定义如式(14)所示。

$$W_d(x, y) = \frac{DoG^+(x, y)}{|DoG^+(x, y)|} \quad (13)$$

$$Inh(x, y) = E(x, y) \cdot W_d(x, y) \quad (14)$$

再利用侧抑制信息调节参数调节初级视皮层非经典感受野的侧抑制强度,得到最终的神经元响应 $E(x, y)$,其中 α 为经典感受野和非经典感受野中神经元的连接强度。

$$E(x, y) = E(x, y) - \alpha \cdot W_{LGN}(x, y) \cdot Inh(x, y) \quad (15)$$

1.4 算法流程

利用对比度适应敏感的神经元构建对比度适应的感受野模型,生成携带轮廓强度信息的响应,计算外膝体经典感受野和非经典感受野的差异性,并以距离因素加以量化处理,得到侧抑制信息调节网络。然后计算初级视皮层的侧抑制能量,并由上述网络加以调节,对初级视皮层经典感受野响应进行抑制,再经过非极大值抑制和滞后阈值处理得到最终的轮廓图。算法流程见图3。

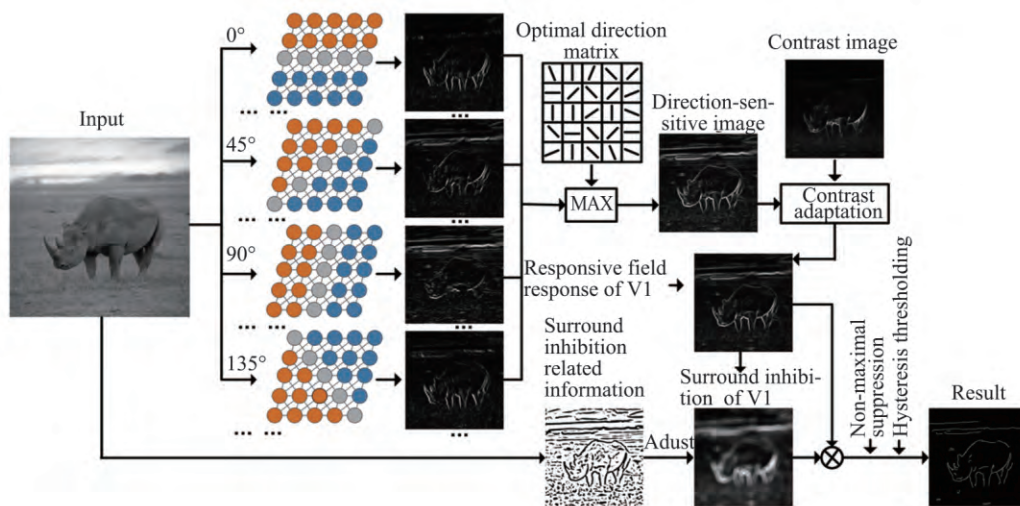


图3 算法流程图
Fig. 3 Flow chart of algorithm

1) 根据原始灰度图像 $I(x, y)$ 计算相应的对比度特征图, 局部对比度可由式 (3)、(4) 计算得到, 构建相同尺寸的对比度适应调节网络, 网络接受每个像素点的局部对比度作为输入, 按照式 (1)、(2) 可以计算对比度适应机制调节参数 W_{con} 的大小。

2) 根据初级视皮层的方向选择性, 由式 (5) 计算得到不同方向的感受野响应, 并在 winner-take-all 原则基础上, 将最强响应作为边界输出, 再使用步骤 1) 中得到的 W_{con} 对感受野的响应强度进行调节, 如式 (6) 所示, 得到携带对比度与轮廓信息的感受野响应。

3) 根据式 (7) ~ (10) 计算 LGN 经典感受野和非经典感受野视觉输入之间的差异程度, 用于模拟 LGN 外膝体非经典感受野的侧抑制信息。同时引入局部半波整流对这种差异性进行微调并且通过幂指数归一化得到侧抑制信息关联参数 W_{LGN} , 如式 (11)、(12) 所示。

4) 根据式 (13) 计算考虑距离因素的 V1 层侧抑制权重, 并由此根据式 (14) 计算初级视皮层侧抑制强度, 再通过前述获取的侧抑制信息关联参

数 W_{LGN} 对初级视皮层的侧抑制强度进行调节, 并由式 (15) 所示, 计算最终的轮廓响应。

5) 对步骤 4) 中得到的轮廓响应进行非极大值抑制处理和滞后门限处理, 获得图像轮廓响应的二值图。

2 结果与分析

自然场景图像的轮廓检测是用图像方法分析自然场景的基本步骤之一, 而自然场景图像存在主体轮廓和无关纹理的相似性、形态多变、噪声干扰等不利于轮廓检测的因素。本文使用包含 40 幅灰度自然图像的 RuG 图像库进行测试, 以验证方法的有效性。图库中的每张图均有一张人工绘制的基准轮廓图, 是用于衡量轮廓检测方法有效性的定量评测指标, 选取图库中具有代表性的部分图像作为实验对象, 图 4 为定性分析结果。

为了得到本文方法性能的定量评测, 使用文献 [9] 中的轮廓评价指标对本文方法评估。鉴于检测到的轮廓像素点与基准轮廓图的像素点存在一定的偏差, 因此将存在于基准轮廓像素 5×5 域内的检测轮廓点视为正确的结果。定义 E_{BC} 和

表 1 图 4 所示图像对应的参数设置及性能指标
Table 1 Set parameters and performance of detection in Fig. 4

Image	Algorithm	Parameter		Performance		
		α	t	e_{FP}	e_{FN}	P
Bear5	DG		0.10	3.30	0.13	0.22
	SSC		0.10	2.56	0.19	0.26
	ISO	1.2	0.10	1.48	0.40	0.30
	New method*	1.4	0.10	1.21	0.25	0.37
Hyena	DG		0.10	0.65	0.09	0.56
	SSC		0.10	0.55	0.14	0.57
	ISO	0.90	0.10	0.21	0.27	0.61
	New method*	0.80	0.10	0.18	0.25	0.65
Tiger	DG		0.10	0.90	0.12	0.49
	SSC		0.10	0.85	0.16	0.49
	ISO	0.90	0.10	0.53	0.23	0.54
	New method*	1.00	0.10	0.32	0.27	0.59
Rino	DG		0.10	1.79	0.10	0.34
	SSC		0.10	1.18	0.16	0.42
	ISO	1.1	0.10	0.36	0.24	0.58
	New method*	1.2	0.10	0.34	0.21	0.62
Bears	DG		0.10	2.74	0.21	0.25
	SSC		0.10	2.03	0.25	0.29
	ISO	1.3	0.10	1.05	0.48	0.32
	New method*	1.3	0.10	0.90	0.32	0.42

Note: * means the method proposed in this paper.

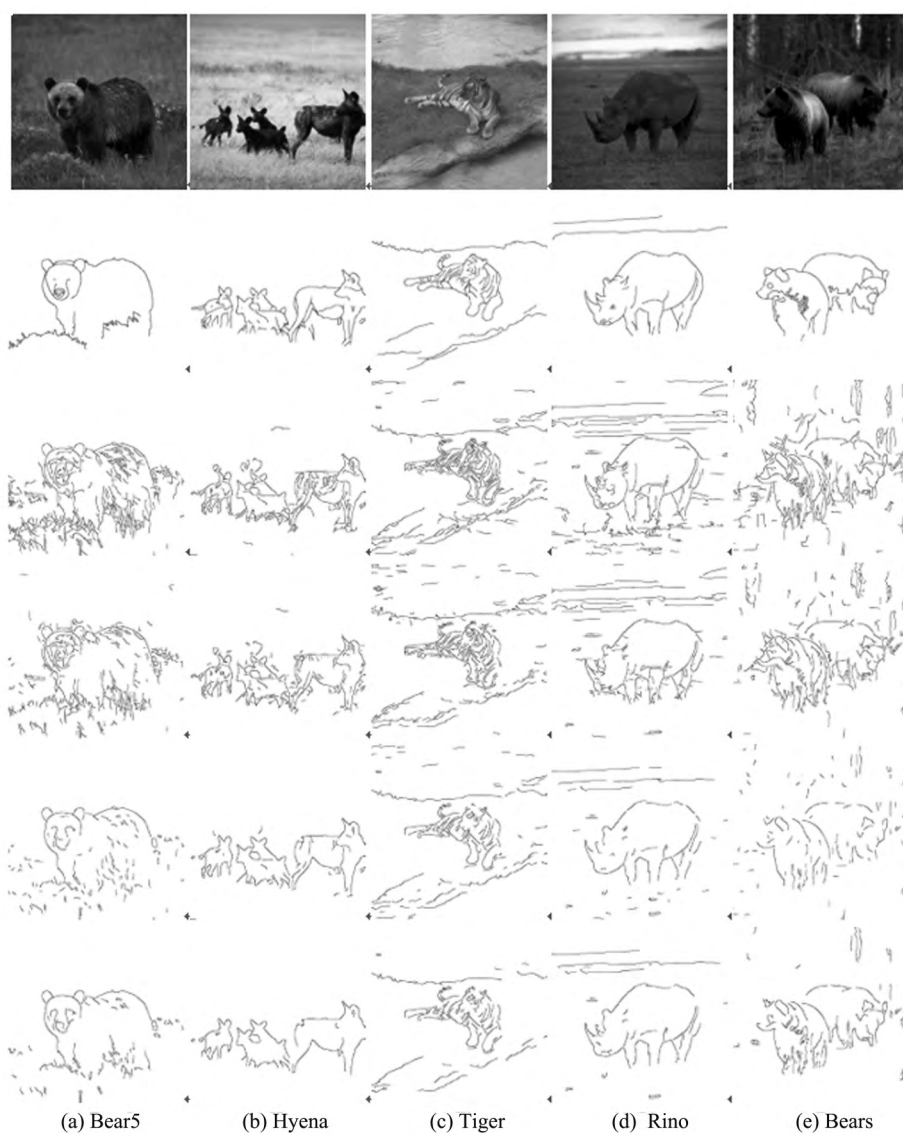


图 4 RuG 中具有代表性的图片及其轮廓检测结果

Fig. 4 Some representative images of RuG dataset and their contour detection results

First row includes selected images of grey natural scenes, (a) Bear5 has strong texture interference; (b) Hyena has a lot of target subjects; (c) Tiger has rich texture details; (d) Rhino's contour is similar to background; (e) Bears' background is complex. Second row is ground truth; third row is result of DG; fourth row is result of SSC; fifth row is result of ISO; sixth row is result of proposed method.

E_{GT} 分别为算法检测到的轮廓像素集和基准轮廓像素集, 则算法正确检测到的像素为: $(\oplus$ 为膨胀操作, T 为 5×5 的结构单元) 错误检测到的像素集为 $E_{FP} = E_{BC} - E$, 漏检的像素集为 $E_{FN} = E_{GT} - (E_{GT} \cap (E_{BC} \oplus T))$ 。算法性能评测指标误检率 e_{FP} 、漏检率 e_{FN} 和整体性能指标 P 定义分别如式 (16) ~ (18) 所示。其中 $card(X)$ 表示集合 X 中的元素个数。

$$e_{FP} = card(E_{FP}) / card(E_{GT}) \quad (16)$$

$$e_{FN} = card(E_{FN}) / card(E_{GT}) \quad (17)$$

$$P = \frac{card(E)}{card(E) + card(E_{FP}) + card(E_{FN})} \quad (18)$$

为了证明本文方法的优越性, 首先选取类似 Gabor 滤波器的二维高斯导函数 DG, 以证明本文方法的有效性; 其次选取文献 [13] 中除去颜色双拮抗机制并适用于单通道灰度图像的空间稀疏限制方法 SSC, 突出本文纹理抑制方法的优势; 最后

选取文献[9]提出的各向同性抑制模型 ISO,体现对比度适应机制的有效性。实验中,连接参数 $\alpha = [0.6:0.1:1.5]$,为了能与人工绘制的标准轮廓图进行比较,轮廓响应图还需要进行非极大值抑制处理和滞后阈值处理。其中滞后阈值处理的上限阈值 $t = [0.1:0.05:0.8]$,因此对于本文方法和 ISO 方法共有 150 测试参数,而由于 DG、SSC 方法不涉及系数 α ,故仅测试 15 组参数。

从以上实验结果可知,在定量和定性分析上,本文的算法相对而言具有较好的轮廓检测性能,特别在处理纹理噪声较多、主体与背景相似度高、背景复杂以及主体轮廓细节丰富的图像时性能突出,在图 4 中的定性分析和表 1 中定量的评测指标中都可验证这一结论。

与其他方法比较可以发现,DG 方法仅考虑了感受野的方向敏感特性,虽检测到主体轮廓但并没有对无关纹理进行抑制,存在明显的过检测现象;SSC 方法通过数学方法构建空间系数约束去除冗余信息,抑制纹理噪声,但纹理区域经常存在多尺度、多朝向的边缘,导致系数度量指标不能很好的区分纹理区域,故而在检测结果中主体轮廓附近存在较多的毛刺;ISO 方法综合考虑局部细节和全局特征,基于非经典感受野的生理特性有效抑制纹理,相较于上述的方法,轮廓误检率得以下降。而本文提出的方法,体现出外膝体和初级视皮层侧抑制机制的关联性,结合高效表征图像的对比度信息与感受野响应,检测得到的轮廓更为清晰,纹理噪声得到极大抑制,相对于前述方法具有明显的优势。

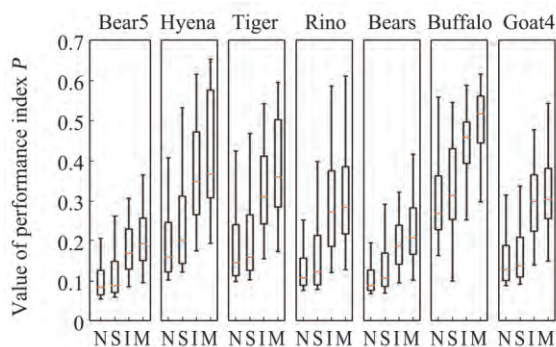


图5 部分自然图像多组参数下检测结果的 P 值箱形图
Fig.5 P -value box plots of natural image detection results under multiple sets of parameters

Note: N represents DG method, S represents SSC method, I represents ISO method, and M represents proposed method.

此外,为评估本文方法在更多图片以及更多参数组合下的性能表现,统计图库中图像检测结果 P 值的箱形图(图 5)。图中每个箱图的顶端横线、中间水平横线分别代表算法在各参数组合中取得的最优结果与不同参数下 P 的中值。由统计结果可见,在大部分测试图像中,本文算法均能取得较优的性能表现。

3 结论

本文通过研究初级视皮层感受野的对比度适应机制及其方向选择特性,探讨了初级视皮层非经典感受野侧抑制机制的形成原因与外膝体之间的联系,建立了侧抑制信息的关联模型,摒弃基于数学模型模拟视觉机制的传统方法,提出了一种结合对比度适应与侧抑制信息关联的图像轮廓检测方法。根据 RuG 图像库内自然图像的轮廓检测结果,与 DG、ISO 以及 SSC 进行定量与定性上的比较分析,表明本文通过对比度适应机制凸显了轮廓强度信息,再通过经调制后的初级视皮层侧抑制机制进行有效的信息筛选,在保护了微弱的真实轮廓的同时有效抑制了无关纹理噪声,因而获得了更好的效果。本文提出的结合对比度适应与侧抑制信息关联的图像轮廓检测方法,将为图像显著轮廓检测技术提供新的思路,对探讨高级皮层视觉特性的应用具有重要意义。

[参考文献]

- [1] Papari G, Petkov N. Edge and line oriented contour detection: State of the art [J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(2): 79-103.
- [2] 张春雪. 图像的边缘检测方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
Zhang CX. Research on image edge detection [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [3] Lopez-Molina C, Baets BD, Bustince H, et al. Multiscale edge detection based on Gaussian smoothing and edge tracking [J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 44(1): 101-111.
- [4] Gardiner B, Coleman SA, Scotney BW. Multiscale edge detection using a finite element framework for hexagonal pixel-based images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(4): 1849-1861.
- [5] Yang KF, Li CY, Li YJ. Multifeature-based surround inhibition improves contour detection in natural images [J]. IEEE Trans Image Process, 2014, 23(12): 5020-5032.
- [6] Ewa KL. Edge detection on images of pseudoimpedance section supported by context and adaptive transformation model images [J]. Studia Geotechnica Et Mechanica, 2014, 36(1): 29-36.
- [7] 杨柳, 汪天富, 林江莉, 等. 基于平均曲率流活动轮廓模型的超声医学图像边缘提取 [J]. 航天医学与医学工程, 2007, 20(3): 205-208.

- Yang L, Wang TF, Lin JL, et al. Edge detection of ultrasound medical image using mean curvature vector flow deformable models [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2007, 20(3): 205-208.
- [8] 沈嘉琳, 汪源源, 王涌, 等. 基于灰度阈值分割和动态规划的超声图像乳腺肿瘤边缘提取[J]. 航天医学与医学工程, 2005, 18(4): 281-286.
- Shen JL, Wang YY, W Y, et al. Boundary extraction of ultrasonic breast tumor image based on gray-level threshold segmentation and dynamic programming [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2005, 18(4): 281-286.
- [9] Grigorescu C, Petkov N, Westenberg M. Contour detection based on nonclassical receptive field inhibition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(7): 729-739.
- [10] 桑农, 唐奇伶, 张天序. 基于初级视皮层抑制的轮廓检测方法[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 47-51.
- Sang N, Tang QL, Zhang TX. Contour detection based on inhibition of primary visual cortex [J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2007, 26(1): 47-51.
- [11] 片兆宇, 孟祥萍. 一种基于生物视觉感知的轮廓检测模型[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(5): 362-366.
- Pian ZY, Meng XP. A contour detection model based on biological visual perception [J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2009, 28(5): 362-366.
- [12] 廖进文, 范影乐, 武薇, 等. 基于点阵神经元响应时空信息的菌落图像边缘检测[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(2): 94-100.
- Liao JW, Fan YL, Wu W, et al. Based on spatial and temporal information of responses from lattice neurons [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(2): 94-100.
- [13] Yang KF, Gao SB, Guo CF, et al. Boundary detection using double-opponency and spatial sparseness constraint [J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2015, 24(8): 2565.
- [14] Carandini M, Movshon JA, Ferster D. Pattern adaptation and cross-orientation interactions in the primary visual cortex [J]. Neuropharmacology, 1998, 37(4-5): 501-511.
- [15] 王光清. 初级视皮层神经元对对比度分布的动态适应 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- Wang GQ. Dynamic adaptation of contrast distribution in primary visual cortical neurons [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [16] Lindgren JT, Hurri J, Hyvarinen A. Spatial dependencies between local luminance and contrast in natural images [J]. Journal of Vision, 2008, 8(12): 1-13.
- [17] Zaltsman J. The development of orientation and direction selectivity in the primary visual cortex and lateral geniculate nucleus [D]. Massachusetts: Brandeis University, 2015.
- [18] Giorno AD, Zhu M, Rozell CJ. A sparse coding model of V1 produces surround suppression effects in response to natural scenes [J]. BMC Neuroscience, 2013, 14(S): 335.
- [19] Zeng C, Li Y, Li C. Center-surround interaction with adaptive inhibition: A computational model for contour detection [J]. Neuroimage, 2011, 55(1): 49-66.
- [20] Lin C, Ya L, Cao Y. Contour detection model with movement mechanism based on receptive field properties [J]. Computer Engineering & Applications, 2016, 5(24): 210-216.
- [21] 寿天德. 视觉信息处理的脑机制(第2版) [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- Shou TD. Brain Mechanism of Visual Information Processing (Second Edition) [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [22] Smith MA. Surround suppression in the early visual system [J]. The Journal of Neuroscience, 2006, 26(14): 3624-3625.
- [23] Ozeki H, Sadakane O, Akasaki T, et al. Relationship between excitation and inhibition underlying size tuning and contextual response modulation in the cat primary visual cortex [J]. Journal of Neuroscience: the Official Journal of the Society for Neuroscience, 2004, 24(6): 1428-1438.

(责任编辑: 刘洪涛)