

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **6**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年6月 第17卷 第6期(总第194期)

目次

综述

人脸图像的年龄估计技术研究 王先梅, 梁玲燕, 王志良, 胡四泉(603)

图像统计模型参数估计中的期望最大值算法 李旭超(619)

图像处理和编码

鲁棒的梯度驱动图像修复算法 叶学义, 王靖, 赵知劲, 陈华华(630)

快速去块效应的线性规划方法 金剑秋, 刘春晓, 王勋, 章志勇(636)

DWT-SVD 域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法 叶天语(644)

Mean-shift 滤波和直方图增强的图像弱边缘提取 冀峰, 高新波, 谢松云(651)

图像分析和识别

梯度点对约束的结构化车道检测 王永忠, 王晓云, 文成林(657)

多水平外区抑制的轮廓检测 闫超, 张建州(664)

基于局部投影与块 LBP 特征的图像检索 邹彬, 潘志斌, 胡森(671)

图像理解和计算机视觉

视觉陌生度驱动的增量自主式视觉学习算法 瞿心昱, 姚明海, 顾勤龙(678)

霍夫空间中多足球机器人协作目标定位算法 许家铭, 解仑, 王志良, 倪善超(687)

计算机图形学

虚拟 CCD 线阵星载光学传感器内视场拼接 张过, 刘斌, 江万寿(696)

“第八届数字电视与无线多媒体通信国际论坛”会议专栏

追踪盗版者的抗共谋数字指纹 李晓强, 张煌, 赵洋洋, 汪晶晶(702)

LBP 与鉴别模式结合的热红外人脸识别 谢志华, 伍世虔, 方志军(707)

电影中复杂事件的检索与识别 杜吉祥, 郭一兰, 翟传敏(712)

方向特征和网格特征融合的离线签名鉴别 杨丹凤, 吕岳(717)

视觉关注度的立体图像质量评价 张艳, 安平, 张秋闻, 张兆杨(722)

低开销的异构数据交换 赵凯, 赵正德(726)

灵活的多视点视频编码预测结构 张艳, 蔡灿辉(730)

跨层反馈在无线视频自适应编码中的应用 王垚中, 郑世宝, 张重阳, 刘勃(736)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 6 期

2012 年 6 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa. ac. cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www. cijg. cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa. ac. cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 6 June 2012

Contents

Review

- Age estimation by facial image: a survey Wang Xianmei, Liang Lingyan, Wang Zhiliang, Hu Siqian(603)
Expectation maximization method for parameter estimation of image statistical model Li Xuchao(619)

Image Processing and Coding

- Robust gradient driving image inpainting method Ye Xueyi, Wang Jing, Zhao Zhijing, Chen Huahua(630)
Fast image de-blocking by linear programming Jin Jianqiu, Liu Chunxiao, Wang Xun, Zhang Zhiyong(636)
Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain Ye Tianyu(644)
Weak edge detection using Mean-shift filtering and histogram enhancement Ji Feng, Gao Xinbo, Xie Songyun(651)

Image Analysis and Recognition

- Gradient-pair constraint for structure lane detection Wang Yongzhong, Wang Xiaoyun, Wen Chenglin(657)
Contour detection based on multilevel inhibition Yan Chao, Zhang Jianzhou(664)
Image retrieval method based on local projection and block LBP feature Zou Bin, Pan Zhibin, Hu Sen(671)

Image Understanding and Computer Vision

- Visual novelty driven incremental and autonomous visual learning algorithm Qu Xinyu, Yao Minghai, Gu Qinlong(678)
Target localization algorithm for cooperative multi-soccer robots based on Hough space
..... Xu Jiaming, Xie Lun, Wang Zhiliang, Ni Shanchao(687)

Computer Graphics

- Inner FOV stitching algorithm of spaceborne optical sensor based on the virtual CCD line
..... Zhang Guo, Liu Bin, Jiang Wangshou(696)

Special Issue of the IFIC' 2011

- Anti-collusion fingerprinting scheme capable of tracing pirate Li Xiaoqiang, Zhang Huang, Zhao Yangyang, Wang Jingjing(702)
Infrared face recognition using LBP and discrimination patterns Xie Zhihua, Wu Shiqian, Fang Zhijun(707)
Recognize and retrieval complex events in real movies Du Jixiang, Guo Yilan, Zhai Chuanmin(712)
Off-line signature verification based on combination of direction feature and grid feature Yang Danfeng, Lv Yue(717)
Stereo image quality assessment based on visual attention Zhang Yan, An Ping, Zhang Qiuwen, Zhang Zhaoyang(722)
Low overhead of heterogeneous data exchange Zhao Kai, Zhao Zhengde(726)
Flexible prediction structure for multi-view video coding Zhang Yan, Cai Canhui(730)
Cross-layer feedback based adaptive coding for wireless video transmission
..... Wang Yaozhong, Zheng Shibao, Zhang Chongyang, Liu Bo(736)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)06-0664-07

论文引用格式: 闫超, 张建国. 多水平外区抑制的轮廓检测[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 664-670.

多水平外区抑制的轮廓检测

闫超, 张建国

四川大学计算机学院, 成都 610065

摘要: 提取自然图像中的物体轮廓是机器视觉研究的重要问题, 主要困难在于自然图像中的纹理性边缘严重干扰了物体轮廓的提取。研究表明视皮层方位选择性神经元的非经典感受野机制使得人类视觉系统在处理自然图像时不仅能够抑制纹理性边缘, 而且能够增强物体的轮廓。基于此人们提出多种仿生轮廓检测算法, 但算法中被称为抑制水平的参量在取值较高时会漏检部分轮廓, 而在其取值较低时又会引入过多的纹理性边缘。针对这一问题, 提出多水平外区抑制轮廓检测算法, 通过整合各级单水平外区抑制的检测信息, 有效抑制了纹理性边缘和降低了漏检轮廓的可能性。实验结果表明, 相对于传统算法, 新算法在轮廓检测性能上提高了10%左右, 并具有更好的稳健性。

关键词: 轮廓检测; 纹理性边缘; 非经典感受野; 多水平抑制

Contour detection based on multilevel inhibition

Yan Chao, Zhang Jianzhou

College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Detecting object contours from natural images plays an important role in machine vision. However, because of the texture edges existing in natural images, it becomes very hard to implement. Relevant research on orientation selective neurons in the primary visual cortex shows, that a mechanism, called non-classical receptive field, can inhibit texture edges and facilitate isolated edges when the visual system processes natural images. Many biologically motivated models have been proposed for contour detection, but they share a common problem which is that some contour elements will be lost if the value of inhibition level is set to high, while some texture edges will be retained if it is set to low. In order to solve this problem, we present a new model, which combines the information from different inhibition levels. It effectively suppresses texture edges and reduces the possibility of losing contour elements. Experimental results show that in comparison with the traditional algorithms, the new algorithm increases performance about ten percent and is more robust.

Key words: contour detection; texture edge; non-classical receptive field; multilevel inhibition

0 引言

轮廓检测在机器视觉中有着广泛的应用。为此, 人们已经提出了大量的轮廓检测算法, 诸如基于相位^[1]、主动轮廓^[2]、图论^[3]及知觉组织^[4]的计算

模型等。尽管如此, 轮廓检测仍然是一个非常活跃的领域, 不断地有人尝试改进现有的算法和提出新的方法。随着对人类视觉系统神经机制的深入研究, 基于视觉特性的轮廓检测方法越来越受到人们的重视。

神经生理学研究表明^[5-6], 视皮层神经元经典

收稿日期: 2011-05-25; 修回日期: 2011-11-08

第一作者简介: 闫超(1985—), 男, 四川大学计算机学院计算机技术专业在读硕士研究生, 研究方向为计算机视觉。E-mail: yancho14@

126.com

感受野的外部存在着大周边抑制区,即所谓的非经典感受野。当同类型刺激同时出现在经典感受野的中心及其外围时,抑制区会减弱神经元对刺激响应。普遍认为,这种外区抑制效应使得视觉系统可以抑制场景中的纹理性边缘,进而感知物体的轮廓。

文献[7]首次根据外区抑制特性提出一种计算模型,用来检测自然图像中的物体轮廓及区域边界。在文献[8]中又将外区抑制嵌入到 Canny 算子^[9]中,以增强算子对轮廓的提取能力。由于轮廓自身也会落在抑制圆环内,所以算法中存在着“自抑制现象”的缺陷。为了克服上述缺陷,文献[10]提出了一种改进型算法,将圆环形的外周抑制区域分解为两个蝶形区域,且蝶形区位于神经元最优方位轴的两侧。随后的研究又发现^[11-12],当外区的同类型刺激与神经元的最佳方位轴共线时,神经元对中心刺激的响应会得到增强。也就是说,非经典感受野对神经元中心区的影响并不仅仅是抑制作用,还存在着易化作用。视皮层这种复杂的神经机制使得人类视觉系统也能感知到场景中较弱的轮廓。文献[13]正是通过引入这种易化功能,建立了新的轮廓检测模型,使得算法也能够检测图像中较弱的轮廓。

由于上述算法都是基于单水平外区抑制的,因此算法中抑制水平的参量需要人工设置,若设置过小,则纹理性边缘得不到有效的抑制;若设置过大,则部分轮廓也会丢失。为了解决上述问题,文献[14]在各向同性的检测模型中首次引入多水平外区抑制机制,并在后处理阶段给出一种简单的组合方法,先对经过各级抑制水平抑制后的边缘集合按照抑制水平的值递增排序,再求出相邻边缘集合的交集,然后对所有的交集进行并集操作得到最后的轮廓输出图像。本文将多水平外区抑制机制引入到各向异性的检测模型中,并提出一种新的组合方法。新算法首先计算图像的高斯梯度幅值和方向,再求出经过各级抑制水平抑制后的边缘集合及其并集与交集,最后采用种子生长的方法对上述边缘信息进行整合以得到物体的轮廓图像。

1 单水平外区抑制检测模型

文献[8]将外区抑制嵌入到基于梯度的边缘检

测算子中,从而使其能够抑制纹理性边缘而保留轮廓。检测算子需要计算图像的梯度,为了消除数字图像的离散化带来的影响^[8],通常使用某种滤波器先对图像进行平滑处理。

令 $I(x, y)$ 为输入的灰度图像,其高斯梯度为

$$\nabla_{\sigma} I(x, y) = \{I * \nabla g_{\sigma}\}(x, y) \quad (1)$$

式中,2 维高斯函数 $g_{\sigma}(x, y)$ 定义为

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

$\nabla g_{\sigma}(x, y)$ 与图像 $I(x, y)$ 卷积得到 $\nabla_{\sigma} I(x, y)$, 这等同于先用 $g_{\sigma}(x, y)$ 对 $I(x, y)$ 做平滑处理再对平滑后的图像进行梯度计算。

用于表示神经元外区抑制效应的距离权重函数由下式决定

$$w_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{\|H(DoG_{\sigma})\|_1} H(DoG_{\sigma}(x, y)) \quad (3)$$

$$H(t) = \begin{cases} t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$DoG_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi(4\sigma)^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2(4\sigma)^2}\right] - \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中, $\|*\|_1$ 表示 L_1 范数(对函数先取绝对值再求积分), $H(t)$ 保证感受野中心不会参与外区抑制。距离权重函数模拟了抑制外区的刺激对神经元响应的抑制程度,它随着外区刺激与中心刺激的距离增加而减小。

在各向异性情况下,抑制外区条形刺激与感受野的方位对比度也会影响该刺激对神经元响应的抑制程度。当外区刺激与中心刺激的方位相同时抑制程度最强,而在方位垂直的时候抑制程度最弱,这一现象可由余弦函数来模拟

$$\Delta_{\sigma}(x, y, x - u, y - v) = |\cos(\theta_{\sigma}(x, y) - \theta_{\sigma}(x - u, y - v))| \quad (6)$$

式中, $\theta_{\sigma}(x, y)$ 表示点 (x, y) 的梯度方向。

对梯度幅值图像 $|\nabla_{\sigma} I(x, y)|$ 中的每个点 (x, y) , 其各向异性外区抑制参量 $T_{\sigma}(x, y)$ 定义为

$$T_{\sigma}(x, y) = \iint_{\Omega} [|\nabla_{\sigma} I(x - u, y - v)| \times w_{\sigma}(u, v) \times \Delta_{\sigma}(x, y, x - u, y - v)] dudv \quad (7)$$

式中, $(u, v) \in \Omega$ 为外区中所有抑制点的集合, 则图像梯度幅值 $|\nabla_{\sigma} I(x, y)|$ 经过抑制后的响应为

$$C_{\sigma}(x, y) = H(|\nabla_{\sigma} I(x, y)| - \lambda T_{\sigma}(x, y)) \quad (8)$$

式中, λ 为抑制水平, 值越大抑制效果越强。

文献[13]在蝶形抑制模型的基础上又增加了两个易化端。图1展示了该算法的基本思想, 它将非经典感受野分成4个部分, 两个抑制区分布于感受野轴向的两侧, 而易化区位于感受野轴向的两端。抑制区的刺激会对神经元的响应产生抑制作用, 而易化区的刺激会对神经元的响应产生增强作用, 抑制区与易化区面积之比为5:1^[13]。这时外区抑制量和易化量分别定义为

$$T_{\sigma}^1(x, y) = \iint_{\Omega_1} [|\nabla_{\sigma} I(x-u, y-v)| \times w_{\sigma}(u, v) \times \Delta_{\sigma}(x, y, x-u, y-v)] dudv \quad (9)$$

$$T_{\sigma}^2(x, y) = \iint_{\Omega_2} [|\nabla_{\sigma} I(x-u, y-v)| \times w_{\sigma}(u, v) \times \Delta_{\sigma}(x, y, x-u, y-v)] dudv \quad (10)$$

式中, Ω_1 和 Ω_2 分别表示抑制区点的集合和易化区点的集合。若易化量大于抑制量, 则纹理边缘经过外区作用后会产生输出响应; 若易化量过小, 则弱轮廓就得不到增强, 因此外区作用整体上应该表现为抑制作用。令文献[13]中抑制因子与易化因子取值都为1, 即得本文所需要的改进型外区抑制参量

$$T'_{\sigma}(x, y) = T_{\sigma}^1(x, y) - T_{\sigma}^2(x, y) \quad (11)$$

则图像的梯度幅值 $|\nabla_{\sigma} I(x, y)|$ 经过改进型外区抑制后的响应定义为

$$C(x, y) = H'(|\nabla_{\sigma} I(x, y)| - \lambda T'_{\sigma}(x, y)) \quad (12)$$

$$H'(t) = \begin{cases} T & t \geq T \\ 0 & t < 0 \\ t & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中, λ 为抑制水平, T 为像素最大值。式(13)保证像素点的取值不超过限定的边界。

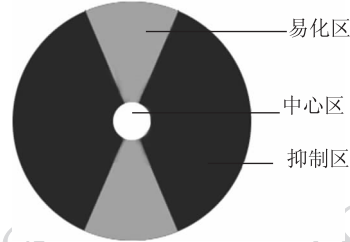


图1 复合感受野各区域

Fig. 1 Sectors in composite receptive field

2 多水平外区抑制计算模型

为避免单水平的缺陷, 将文献[14]中的多水平思想应用到上述基于各向异性外区抑制的计算模型中, 并提出一种新的组合方式以整合各级单水平的抑制响应, 新模型中不再需要用户去设置抑制水平 λ 的值, 图2显示了算法的整个流程。

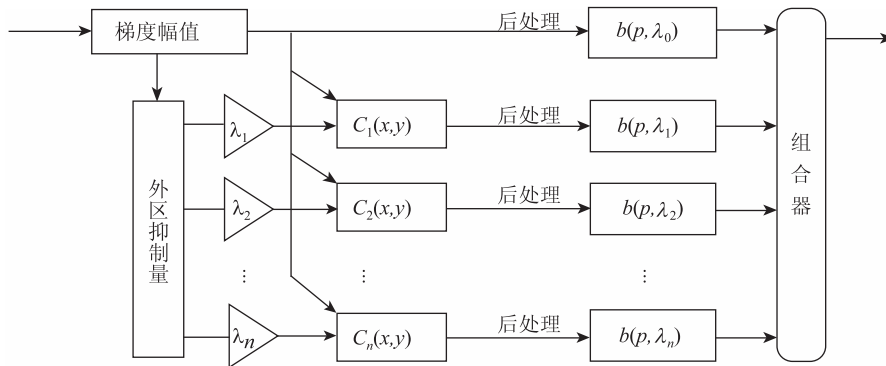


图2 基于多水平外区抑制的轮廓检测方法

Fig. 2 Contour detection based on multilevel inhibition

梯度幅值 $|\nabla_{\sigma} I(x, y)|$ 经过抑制水平 $\lambda_k (k \in [0, n])$ 抑制后得到响应集合 $C_k(x, y)$, 接着对响应集合进行后处理, 此过程包含两个子处理算法, 即非极大值抑制和双迟滞阈值算法, 与 Canny 算子一致^[9]。

非极大值抑制^[9]可以细化边缘以满足单边响应准则(边缘响应只有一个像素宽), 接着对得到的

候选轮廓像素进行双迟滞阈值操作, 操作中要用到两个阈值 t_l 和 $t_h (t_l < t_h)$ 。通常 t_h 的计算与分位数 p 有关, 如果图像中包含 N 个候选轮廓像素, 则按照其响应值从大到小排列后, 输出轮廓点集中至少应包含前 pN 个候选轮廓像素, 因此可将前 pN 个候选轮廓像素中的最小响应值作为 t_h 的值, 而 t_l 的值可取 $0.5t_h$ 。对于那些响应值不小于 t_h 的候选轮廓

像素,将直接作为轮廓点输出到2值图像 $b(p, \lambda_k)$ 中;而那些响应值介于 t_l 与 t_h 之间的候选轮廓像素,若能通过某种方式与任一轮廓像素(响应值不小于 t_h)相关联,则将其也加入到 $b(p, \lambda_k)$ 中;剩下的响应值小于 t_l 的候选轮廓像素将被丢弃。

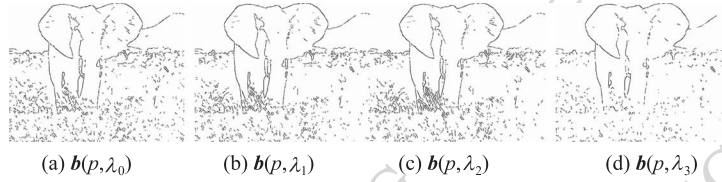


图3 集合 $b(p, \lambda_k)$ 的图像,其中 p 恒为 0.15

Fig.3 Images of sets $b(p, \lambda_k)$ for $p = 0.15$

为了能够整合不同抑制水平的边缘集合 $b(p, \lambda_k)$,在随后的组合器中首先定义了并集和交集两种集合运算,即

$$B_{\cup}(p, \lambda) = \bigcup_{k=0}^n b(p, \lambda_k) \quad (14)$$

$$B_{\cap}(p, \lambda) = \bigcap_{k=0}^n b(p, \lambda_k) \quad (15)$$

图4(a)(b)显示了两种集合运算所得到的图像。由于交集运算去除了大量的纹理性边缘和少量的轮廓,并集运算包含了完整的边缘信息(轮廓和纹理性边缘),因此以交集图像和并集图像为基础,结合种子生长思想^[15],提供一种新的组合方法,即将交集图像 $B_{\cap}(p, \lambda)$ 中的所有边缘点作为原始的种子点集,在并集图像 $B_{\cup}(p, \lambda)$ 中进行种子生长:

1) 令种子点集 $S = B_{\cap}(p, \lambda)$,待生长点集 $G = B_{\cup}(p, \lambda)$,输出轮廓点集 $O = \emptyset$, $Value()$ 表示求灰度值;

2) 计算 $T = (S - O)$,若 T 为空集,则转入步骤4),若非空,则任选一点 $P \in T$,转入步骤3);

3) 将当前点 P 并入 O ,依次考察点 P 在 G 中的8个邻近点 $T_i (i=0, 1, \dots, 7)$,若 $(T_i \notin O)$ 且 $(Value(T_i) = Value(P))$,则令点 T_i 作为当前点,进入步骤3)开始新一轮递归调用,否则考察下一个邻近点,当遍历完所有邻近点时,返回上一层,当整个递归过程结束时,转入步骤2);

4) 将 O 作为最终输出进行显示。

这样自然图像中许多凌乱且不连续的纹理性边缘,即那些在并集图像中含有而在交集图像中不含有纹理性边缘片段,通过种子生长后并不会出现在输出轮廓图像中;而轮廓的连续性要比凌乱的纹

图3展示了一幅图像经过不同抑制水平处理后的边缘集合,从中能够观察到: λ_k 的一些取值在很好地检测到轮廓的同时也保留了大量的纹理性边缘;另一些取值则相反,即在很好地抑制纹理性边缘的同时也抑制了部分轮廓。

理性边缘强的多,一部分在交集图像中失去的弱轮廓片段,可以通过在并集图像中进行种子生长查找出来,以输出到最终的轮廓图像中。图4(c)给出了一幅图像的整合结果。

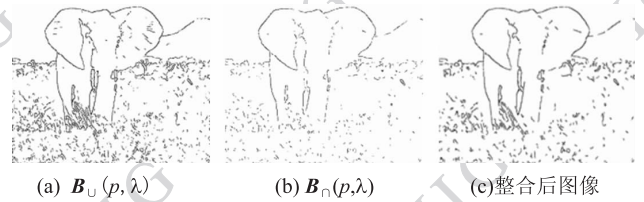


图4 集合图像

Fig.4 Images of sets

3 实验及分析

为验证基于多水平外区抑制的轮廓检测模型,选取40幅带有真实轮廓图的自然图像(来自文献[7])进行测试。实验中,参数 σ 取自集合 $\{1.2, 1.6, 2.0, 2.4\}$,而参数 p 取自集合 $\{0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.2\}$,多水平抑制参数 λ 的最大取值 $\lambda_{\max} = 3$ (该值的取法将在下文详细讨论)。采用文献[7]对轮廓检测性能 P_f 的定义

$$P_f = \frac{\text{card}(\mathbf{E})}{\text{card}(\mathbf{E}) + \text{card}(\mathbf{E}_{\text{FP}}) + \text{card}(\mathbf{E}_{\text{FN}})} \quad (16)$$

式中, $\text{card}()$ 用于计算集合的元素个数,而 \mathbf{E} 表示使用算子正确检测到的轮廓像素集合, \mathbf{E}_{FN} 表示漏检的轮廓像素集合, \mathbf{E}_{FP} 表示虚假的轮廓像素集合(将真实背景像素检测成轮廓像素)。令 \mathbf{E}_{GT} 和 \mathbf{B}_{GT} 分别表示人工标定的真实轮廓像素集合和背景像素集合,而 \mathbf{E}_D 和 \mathbf{B}_D 分别表示算子检测到的轮廓像素集

合和背景像素集合,则有 $E = E_D \cap E_{CT}, E_{FP} = E_D \cap B_{CT}, E_{FN} = E_{CT} \cap B_D$ 。关于 P_f 更加详细的计算原理请参见文献[7]。本节通过各种参数的不同组合,将具体分析新模型(本文提出的多水平检测模型)相对于传统单水平检测模型的优点。将 4 幅具有代表性的图像轮廓检测结果显示在图 5 中, Canny 算子的双阈值按照文献[9]所述方法进行计算,单水平抑制方法与文献[13]相一致,人工标定轮廓图像由文献[7]提供。Canny 算子是边缘检测领域公认的经典算法,但是从图 5 中明显可以观察到, Canny 算子并没有区分纹理性边缘与目标轮廓,这说明传统的边缘检测器很难像人类视觉系统那样能够轻易地检测出复杂场景中的目标轮廓。相反,基于人类视觉神经元外区抑制机制的两种仿生算子都能够有效地抑制纹理性边缘,同时保留目标轮廓,且新模型在保护轮廓的同时更好地抑制了杂乱的纹理性边缘。关于 Canny 算子与传统单水平检测模型的轮廓检测性能的定量对比分析参见文献[7-8, 10, 13]。下面将通过具体的对比数据定量分析新模型与传统单水平检测模型的轮廓检测性能。从式(16)的定义得知,轮廓检测性能 P_f 可以理解为仿生模型检测出来的目标轮廓与人工标定的真实轮廓之间的接近

程度,显然 P_f 值越大说明模型的轮廓检测性能越好。图 6 是两种仿生模型轮廓检测性能的定量对比。横坐标代表抑制水平,其取值只对传统的单水平抑制方法有效,这是因为新模型整合了各级单水平抑制方法的检测信息,抑制水平不再影响新模型的轮廓检测性能。而纵坐标则代表两种仿生模型的轮廓检测性能,由于自然图像中复杂背景的干扰和人工标定的微小偏差常会影响 P_f 值计算的精确度,因此采用统计学方法计算 P_f 值。具体来讲,首先使用新模型对图 5 中的 4 幅图像分别进行计算,得到 4 个 P_f 值,然后再对这 4 个 P_f 值进行加权平均即得到新模型轮廓检测性能的平均值。传统单水平检测模型在各级抑制水平上也按照上述方式进行计算,即可得到一组对应于各级抑制水平的轮廓检测性能平均值。显然,传统单水平抑制方法的检测模型在抑制水平取值不同时,其轮廓检测性能也会发生相应的变化,致使用户很难事先确定抑制水平的值,最终给模型的实际应用带来了困难。相反,新模型的检测模型不再需要用户设置抑制水平的值,并且通过引入新的组合方法,充分考虑了各级单水平的优缺点,使得算法的整体性能得到了约 10% 的提高。

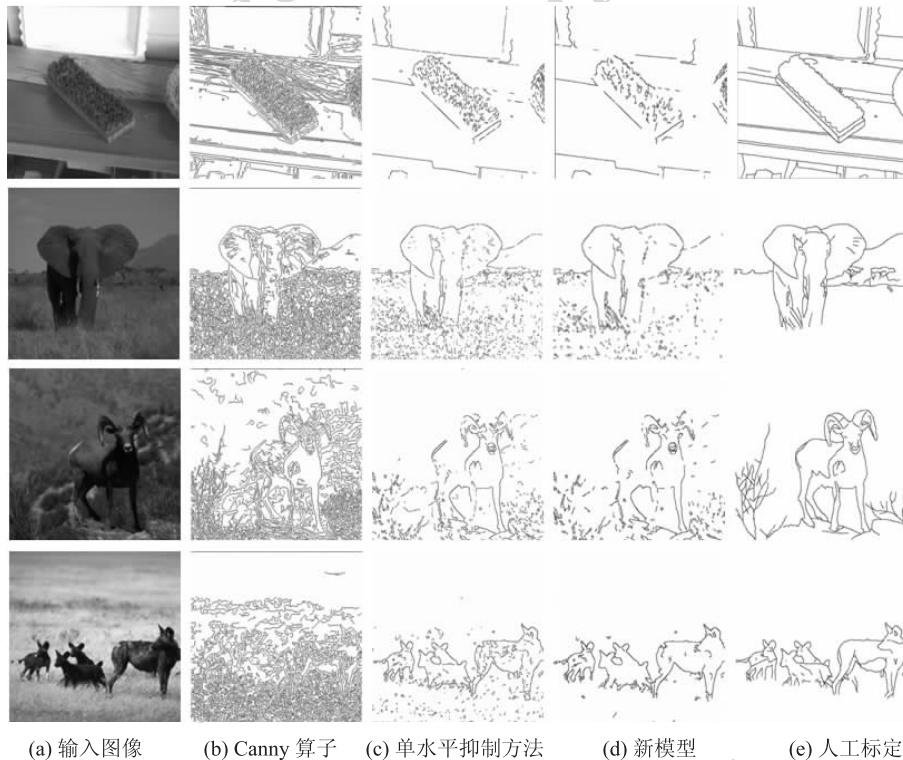


图 5 各计算方法结果显示

Fig. 5 Results display from all kinds of methods

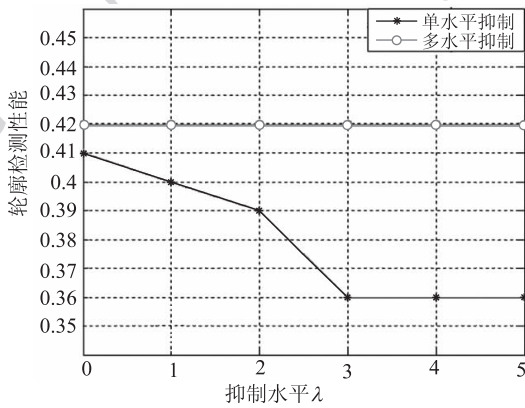


图 6 性能对比($p=0.15$)
Fig. 6 Comparison of performance($p=0.15$)

下面将考察分位数 p 这一参数对模型的影响, 和传统模型一样, 新模型依然无法实现 p 值的自动化选择, 因此有必要对该参数对新、旧模型所造成的影响进行分析^[14]。图 7 显示了新模型与传统单水平检测模型针对图 3 这幅经典图像的实验数据。从图 7 中可以看到, 传统单水平检测模型在参数 λ 取值为 2、3 时, 无论分位数 p 取值多少, 其检测性能都低于新模型; 而在 λ 取值为 1 时, 只有当分位数 p 取值小于 0.07 时, 其检测性能才略高于新模型。据此可知当分位数 p 动态变化时, 新模型相对传统单水平检测模型具有更好的稳健性, 由于实际应用中很难事先推断所有的场景状况, 因此新模型的这种稳健性更具有现实意义。

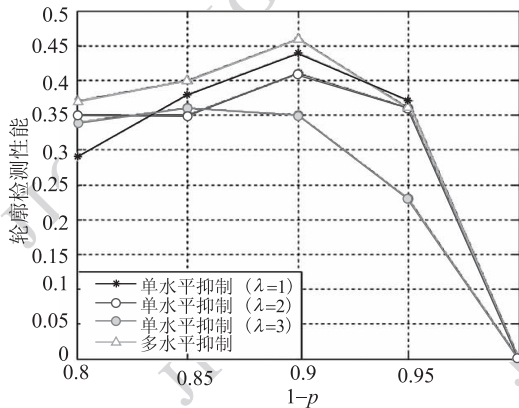


图 7 参数 p 对检测性能的影响
Fig. 7 Effect of the parameter p to the performance

式(12)表明, 当改进型抑制量 $T'_\sigma(x, y) > 0$ 时, 一旦正数 λ 取值超过某个阈值, 必将导致 $|\nabla_\sigma I(x, y)| - \lambda T'_\sigma(x, y) < 0$, 此时由整流函数式(13)可得 $C_\sigma(x, y)$ 恒为零; 与之相反, 当 $T'_\sigma(x, y) < 0$, 正数

λ 超过某个阈值时, 必将导致 $|\nabla_\sigma I(x, y)| - \lambda T'_\sigma(x, y) > T$, 再由整流函数可得 $C_\sigma(x, y)$ 恒为 T ; 而当 $T'_\sigma(x, y) = 0$ 时, λ 取任意值都不会影响 $C_\sigma(x, y)$ 。综上所述, 抑制水平 λ 存在一个作用范围, 当超过这个范围时, 输出响应不再受到其影响。图 6 中单水平抑制方法的性能曲线反映了上述现象, 可以看出当 $\lambda \geq 3$ 时, 模型的检测性能便不再发生变化。这给 λ 的取值范围提供了一个定量参考。由于抑制水平 λ 在 $[0, \lambda_{\max}]$ 范围内取值越精细, 则组合运算得到的信息就越多, 但计算复杂性也会随之提高。这里采用的折衷方案是 $\lambda_{\max} = 3$, λ 在 $[0, \lambda_{\max}]$ 范围内只取整数值。

在各向异性情况下, 计算图像中每个点的外区作用量时必须考虑该点及其周围各点的方向信息, 这导致无法借助 FFT(快速傅里叶变换)加快滤波运算。因此, 与传统单水平检测模型一致, 新模型的时间复杂度主要集中于外区作用量的计算上。令图像大小为 $N \times N$, 高斯滤波器大小为 $M \times M$, 则需要 N^2 次卷积运算, 每次卷积的时间复杂度为 $O(M^2)$, 故总时间复杂度为 $O(N^2 M^2)$ 。当图像大小为 128×128 , 滤波器大小为 25×25 时, 实际运行时间大约为 5 分钟; 当图像大小变为 512×512 , 滤波器大小不变时, 实际运行时间则超过 30 分钟。由此可见, 新模型适合应用于实时性要求不高的场合中。

4 结 论

在机器视觉的多数应用场合中, 轮廓检测是非常重要的中间步骤。根据人类视觉系统的抑制与易化特性提出了一种仿生模型, 该模型可以抑制自然图像中的纹理性边缘并能增强较弱的轮廓或区域边界。相对于传统单水平检测模型, 新模型不仅实现了抑制水平的自动输入, 而且还在后续处理过程中又引入一种新的组合方法进一步提高了轮廓检测的性能。最后的实验中, 通过不同参数的组合, 从定性与定量两个方面分析和验证了新模型的优点。

尽管新模型已经取得了良好的检测性能, 但要取得与人类视觉系统相同的轮廓提取效果, 仍然需要大量的工作来改进新模型。比如, 如何去除轮廓图像中的短小纹理性片段一直是人们研究的难点之一。经验表明, 当背景单一、目标轮廓简单且连续时, 采用直接剔除短小片段的方法即可达到很好的

提取效果;但在自然图像中情况则大为不同,一是短小片段也可以组成真实的目标轮廓,二是由于受到光照、纹理等因素的干扰,部分轮廓常会断裂成短小片段,上述轮廓片段很难与纹理性片段区分开来,致使在剔除短小片段的同时无法被保留下来。此外,短小片段的定义也是需要考虑的问题,一般可令长度小于 L 的轮廓为短小片段,但目前还没有一套完整的数学理论用来计算新参数 L 的取值。如果根据部分检测结果使用统计方法来估算 L 的值,那么将在一定程度上限制模型的自动化程度及应用范围,因为并非所有的场合中都可以精确标定图像中的目标轮廓,从而导致统计方法的失效。

较高的时间复杂度是仿生模型的另一个不足之处,人类视觉系统可以在极短的时间内处理所看到的图像并给出判断,这是现有模型很难比拟的。因此,如何引入和模拟视觉神经元高度并行的计算方式将是下一步工作的重点。此外,人类视觉系统还存在其他视觉神经机制,比如知觉组织、神经元的空间频率选择性等,它们在轮廓感知过程中同样起着非常重要的作用。如何利用这些特性,建立更加符合人类视觉系统的计算模型,也是须进一步考虑的问题。

参考文献 (References)

- [1] Kovesi P. Image features from phase congruency [J]. *Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3): 1-26.
- [2] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: active contour models [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(4): 321-331.
- [3] Parent P, Zucker S W. Trace inference, curvature consistency, and curve detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(8): 823-839.
- [4] Li Y, Zhang J Z, Jiang P. Contour extraction based on surround inhibition and contour grouping [C]//*Proceedings in ACCV 2009*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 687-696.
- [5] Knierim J J, Van Essen D C. Neuronal responses to static texture patterns in area V1 of the alert macaque monkey [J]. *J. Neurophysiol*, 1992, 67(4): 961-980.
- [6] Nothdurft H C, Gallant J, Van Essen D C. Response modulation by texture surround in primate area V1: Correlates of "popout" under anesthesia [J]. *Visual Neuroscience*, 1999, 16(1): 15-34.
- [7] 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.
- [8] Grigorescu C, Petkov N, Westenberg M A. Contour and boundary detection improved by surround suppression of texture edges [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(8): 609-622.
- [9] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [10] Sang N, Tang Q L, Zhang T X. Contour detection based on inhibition of primary visual cortex [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(1): 47-51. [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.]
- [11] Ursino M, La Cara G E. A model of contextual interactions and contour detection in primary visual cortex [J]. *Neural Networks Archive*, 2004, 17(5-6): 719-735.
- [12] Kapadia M K, Westheimer G, Gilbert C D. Spatial distribution of contextual interactions in primary visual cortex and in visual perception [J]. *J. Neurophysiol*, 2000, 84(4): 2048-2062.
- [13] Du X F, Li C H, Li J. Contour detection based on compound receptive field [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(7): 1630-1634. [杜晓凤, 李翠华, 李晶. 基于复合感受野的轮廓检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(7): 1630-1634.]
- [14] Papari G, Petkov N. An improved model for surround suppression by steerable filters and multilevel inhibition with application to contour detection [J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(9): 1999-2007.
- [15] Adams R, Bischof L. Seeded region growing [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(6): 641-647.