

文章编号: 1001 - 9014 (2009) 05 - 0362 - 04

# 一种基于生物视觉感知的轮廓检测模型

片兆宇, 孟祥萍

(长春工程学院 电气与信息工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**提出了一种基于生物视觉的轮廓检测模型. 该模型首先在研究初级视皮层结构的基础上, 模拟了单个细胞的响应函数. 然后通过构造一个新的邻域影响因子来描述感受野神经元间的相互影响. 所提模型在充分考虑邻域刺激与中心神经元间距离、相对位置、最优朝向的差异影响下, 有效地抑制了背景纹理的干扰, 增强了具有相同结构神经元的响应, 得到了清晰的轮廓. 仿真实验表明, 本模型克服了传统算法的不足, 具有更好的检测准确性和稳定性, 并在实际检测中得到满意的结果.

**关键词:**视觉感知; 轮廓检测; Gabor; 邻域影响

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## CONTOUR DETECTION MODEL BASED ON BIOLOGICAL VISUAL PERCEPTION

PIAN Zhao-Yu, MENG Xiang-Ping

(School of Electrical & Information Technology, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** A biological visual based contour detection model was presented. Firstly, the response function of single visual cell was simulated by researching on the structure of primary visual cortex. Then, a new neighboring effect term was constructed to characterize the neighboring interactions of the neurons in receptive field. By considering the difference in distance, position and preferred orientation between neighboring stimuli and the central neuron, the model effectively suppresses the interference of the background texture and enhances the response of the neurons with the same configuration. Thus, it obtains a clear contour. The experimental results show that our model overcomes the drawbacks of the traditional algorithms, and it has a better detection accuracy and stability, and it can obtain the gratifying results in actual detection mission.

**Key words:** visual perception; contour detection; Gabor; neighboring effect

### 引言

物体的轮廓信息是一种重要的形态特征, 在图像处理过程中起着至关重要的作用. 如何检测复杂背景条件下的目标轮廓, 一直是轮廓检测算法的难点. 传统算法由于计算量大、对周期性纹理敏感等原因<sup>[1,2]</sup>, 检测结果中常包含大量的伪轮廓信息.

近些年, 在生物学观点的基础上提出了许多轮廓提取方法<sup>[3-5]</sup>. Kruizinga<sup>[3]</sup>等人提出了一种非线性检测模型, 用于从纹理背景中提取目标轮廓, 为了有效地检测轮廓, 图中纹理必须是周期性出现的. 而桑农<sup>[4]</sup>等人所提的方法虽然都考虑到了邻域神经元的抑制作用, 但却忽略了神经元间的相互增强. Tang等人<sup>[5]</sup>进一步研究了神经元间的相互影响, 提

出了基于同向抑制和共线增强的检测算法. 但在该方法中, 3种影响的重复计算以及抑制和增强作用的重叠计算, 都大大削弱了邻域影响的作用.

本文提出了一种新的轮廓检测算法. 该算法首先在视皮层简单细胞结构的基础上, 建立了单个细胞的响应函数; 然后通过构造一种新的邻域影响因子, 来模拟细胞感受野中心神经元与其邻域神经元间的相互影响. 所提因子在充分考虑邻域刺激与中心神经元间距离、相对位置、最佳朝向角度之间差异的影响下, 有效地平衡了神经元的增强与抑制作用; 同时, 归一化的表达式有效地避免了计算的重复, 更客观地体现了邻域影响的作用.

### 1 计算方法

收稿日期: 2008 - 12 - 05, 修回日期: 2009 - 05 - 30

基金项目: 中国国家自然科学基金资助项目 (60274099)

作者简介: 片兆宇 (1980-), 男, 辽宁抚顺人, 博士, 研究方向为模式识别、图像处理.

Received date: 2008 - 12 - 05, revised date: 2009 - 05 - 30

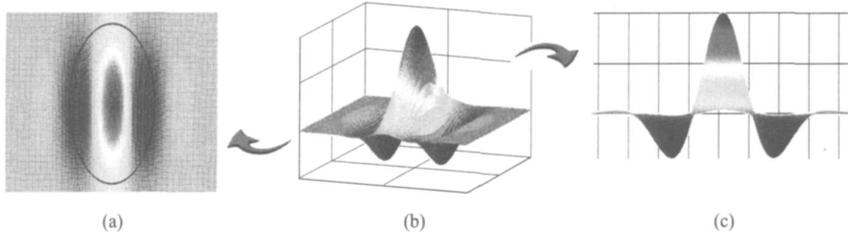


图 1 Gabor函数示意图 (a) Gabor水平投影图 (b)二维 Gabor函数 (c) Gabor垂直投影图  
Fig 1 The schematic of Gabor function (a) the horizontal projection of Gabor (b) the two-dimensional Gabor function (c) the vertical projection of Gabor

1.1 神经元响应函数

在初级视皮层中,图像的轮廓信息主要是由简单细胞响应得到的<sup>[6]</sup>.通过模拟简单细胞神经元的响应函数,可以真实地再现特征定位的过程,更加准确地捕获目标的轮廓信息.简单细胞神经元接受外界刺激的响应函数  $R$  可由下式表示:

$$R = \left[ \int I(x, y) * G(x, y) dx dy \right]^+ = \left[ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I(x, y) * G(x, y) \right]^+, \quad (1)$$

其中,  $I(x, y)$  为待测图像;  $G(x, y)$  为简单细胞的响应模型;  $[*]^+$  表示取正.根据 Jones 和 Palmer 的理论<sup>[6]</sup>,简单细胞神经元的响应模型可以通过 Gabor 函数来模拟实现,假设细胞的中心位置在  $x_0, y_0$  处,则二维 Gabor 函数可以写成如下形式:

$$G_f(x, y) = \exp\left[-\frac{u^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{v^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \cos(2\pi fu + \theta), \quad (2)$$

$$u = (x - x_0) \cdot \cos \theta_0 + (y - y_0) \cdot \sin \theta_0$$

$$v = -(x - x_0) \cdot \sin \theta_0 + (y - y_0) \cdot \cos \theta_0$$

其中,  $x$  和  $y$  表示刺激源在感受野中的位置;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  为函数的标准差,决定细胞感受野的大小,他们之间满足  $\sigma_y = \sigma_x$  的关系;通常在  $0.23 \sim 0.92$  范围内变化.由图 1 可知,  $f$  的大小决定着感受野椭圆的离心率<sup>[6]</sup>.本文仿真中令  $f = 0.5$ .

参数  $f$  表示余弦函数的周期,用来描述感受野的最佳空间频率,基于 DeVabis 的研究<sup>[7]</sup>,  $\sigma_x \cdot f = 0.56$ ,本文令  $f = 0.122$ .

参数  $\theta_0 \in [0, \pi)$  表示感受野的最佳朝向,决定感受野的最优响应.根据神经生理学的研究,每个初级视觉皮层细胞中有 16 个方向神经元.因此,所提模型中假设 Gabor 滤波器使用 16 个等距的最优朝向  $\theta_0 = [0^\circ; 11.25^\circ; \dots; 180^\circ]$ ,来构建视觉细胞神经元.

最后,参数  $\theta$  决定了 Gabor 函数的对称性:当

$\theta = 0$ , Gabor 函数为对称型.当  $\theta = \pm \pi/2$ , 函数为反对称型;其他情况下,函数介于两种形式之间.

为了得到具有位移不变性的轮廓,本文将两个相位滤波结果组合构成 Gabor 能量滤波器<sup>[8]</sup>,来模拟细胞的响应函数,其表达式可写为:

$$E_{x_0, y_0, \theta, f} = \sqrt{R_{x_0, y_0, \theta, f, 0}^2 + R_{x_0, y_0, \theta, f, \pi/2}^2}, \quad (3)$$

其中,  $R_{x_0, y_0, \theta, f, 0}$  和  $R_{x_0, y_0, \theta, f, \pi/2}$  分别是对称和反对称滤波器的响应输出.

1.2 邻域效应

神经生理学已经证明细胞神经元除了响应外界刺激外,还要受到邻域神经元的影响.而邻域影响既存在抑制作用,也存在增强作用;且不同位置的神经元会对中心响应产生不同的影响;其影响程度也会随邻域位置与感受野中心的距离增大而减小.据此,本文提出了一种新的邻域影响因子.

首先,考虑邻域神经元所在位置对中心响应的影响,将邻域划分成两部分,如图 2 所示.区域 I 表示邻域刺激出现在中心感受野的最佳朝向上.若映射到该区域内的刺激与中心响应有相似的朝向,则会对中心响应起到共线增强作用;相反,若二者朝向相差较大,则会因强烈的对比,使得中心神经元的响应增强.而在区域 II 内,邻域神经元对中心神经元的影响则取决于中心与其邻域神经元间的最优朝向差:当二者的朝向一致时,邻域神经元抑制中心响应;当二者朝向相差较大时,因对比关系,形成增强作用.而影响程度可由朝向差来衡量.

若中心神经元的最优朝向为  $\theta_0$ , 在  $(x_s, y_s)$  处的邻域神经元最优朝向为  $\theta_s$ , 则朝向差  $\theta$  定义为:

$$\theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \cos(\theta_0 - \theta_s). \quad (4)$$

当邻域刺激与中心响应有相同的最优朝向时,  $\theta$  达到负最大;当两者方向成直角时,  $\theta$  达到正最大值;其它情况下,朝向差介于二者之间.  $\theta$  的符号可用来描述邻域影响的类型:‘+’表示增强作用,

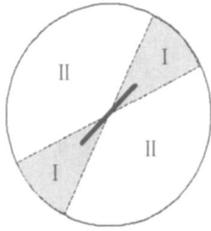


图 2 邻域区域  
Fig 2 The neighboring regions

为抑制作用。

除此之外,邻域神经元对中心响应的影响是与其到中心神经元的距离成反比的,邻域神经元越接近中心神经元,其对中心响应的影响越大;相反,则影响越小。定义距离影响因子  $d$  为:

$$d = \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{4\sigma^2}\right], \quad (5)$$

其中,  $(x, y)$  是以  $(x_0, y_0)$  为中心的邻域内的像素点,本文取邻域大小为  $5 \times 5$  窗口,而  $\sigma$  的取值则与 Gabor 函数的取值相同。

综上所述,考虑邻域刺激与中心响应的距离、相对位置和朝向差异的邻域影响因子  $NE_s$  可写为:

$$NE_s = \begin{cases} d \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{4\sigma^2}\right] \cdot \left|\frac{\sqrt{2}}{2} - \cos(\theta - \theta_0)\right|, & p \leq \frac{1}{16} \\ d \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{4\sigma^2}\right] \cdot \left|\frac{\sqrt{2}}{2} - \cos(\theta - \theta_0)\right|, & p > \frac{1}{16} \end{cases}, \quad (6)$$

其中,  $p = \left| \arccos\left(\frac{x-x_0}{y-y_0}\right) - \theta_0 \right|$  表示邻域刺激所处的位置。当  $p \leq 1/16$  时,表示邻域神经元位于区域 I 内;当  $p > 1/16$  时,表示位于区域 II 内 ( $1/16$  为经验值,可以根据检测需要进行调整)。 $\theta_0$  为  $\theta$  的绝对值。

这样,合并二维 Gabor 能量滤波器和邻域影响因子所得到的轮廓检测模型,可写为:

$$S(x_0, y_0, \theta_0) = [E(x_0, y_0) + \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n E(x, y) \times NE_s(x, y)]^+, \quad (7)$$

其中,  $m, n$  为指定邻域窗口的大小;  $\sigma$  为尺度因子,用来调节邻域影响的强度;  $E(x_0, y_0), E(x, y)$  分别为中心神经元和邻域神经元 16 个朝向中的最优响应值。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验条件

本文选取两幅自然场景图片,从主客观角度对所提算法进行评价。实验中共涉及 3 种轮廓检测算法: Canny 算子, Tang 等人提出的 GA I 算法<sup>[5]</sup>、以及本文所提的 GNE 算法。为了客观地比较检测结果,文中 GA I 算法中所涉及到的参数均选择与参考文献 [5] 中的一致。对于所提算法,令尺度因子  $\sigma = 0.4$ ,其它参数的选择依据上文的讨论。

为了客观评价不同算法的表现,在测试 I 中,应用三种评价标准来比较不同算法的性能,包括均方根误差 (RMSE), Pratt 提出的 F<sub>M</sub> 指标<sup>[9]</sup>,以及性能测量 (PM) 指标<sup>[4]</sup>。所有这些评价标准都是通过比较检测结果与理想轮廓 (GT) 间的差异,来评价算法的性能,其具体定义可参照相关的参考文献。RMSE 的值越小,说明检测越精确;而 F<sub>M</sub> 和 PM 的值越大,说明检测效果越好。

### 2.2 实验 I 的性能评估

3 种算法的检测结果和相应的性能评价值分别列于图 3 和表 1 中。如图 3 所示, Canny 算子和 GA I 算法对纹理信息较敏感,检测的结果中含有大量冗余的纹理边缘;相比之下,所提的 GNE 算法得到了较好的检测结果,不仅很好地抑制了纹理信息,而且保留了更多的轮廓细节。

而通过对表 1 中性能指标的分析可知,所提算法与其它两种检测算子相比,体现了更好的检测性能。GNE 算法的检测结果得到了最小的 RMSE 值和最大的 F<sub>M</sub>、PM 值,这说明所提算法的检测结果比其它两种算法的检测结果更接近理想轮廓,而且更好地抑制了自然景物中的干扰。因此,无论是从视觉感知上,还是与理想轮廓的比较上,都证明了所提算法是一种切实可行的轮廓提取算法。

### 2.3 实验 II 的性能评估

为了验证所提算法的可行性,实验 II 从主客观角度对所提算法进行了测试。此部分将给出一幅具有复杂背景的图像,来验证算法的检测稳定性。

表 1 Elephant 测试的性能指标

Table 1 The performance measures of elephant test			
GT of Elephant	RMSE	F <sub>M</sub>	PM
Canny	15.42	0.176	0.225
GA I	15.04	0.394	0.294
GNE	14.26	0.512	0.427

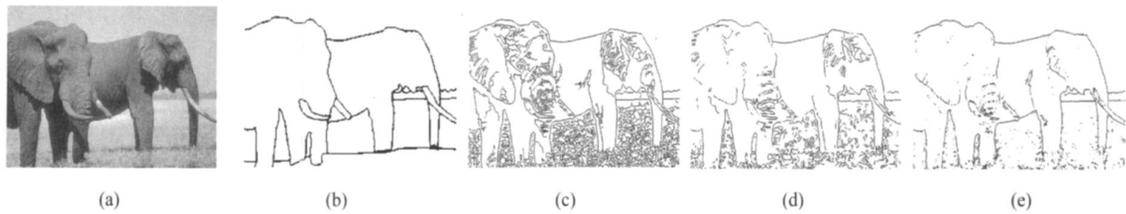


图3 三种算法的对比结果 (a)输入图像 (b)标准 GT (c)Canny 检测结果 (d)GAI 检测结果 (e)GNE 检测结果  
Fig.3 The comparing results of three operations (a) input image (b)the standard GT (c)the result obtained by Canny (d)the result obtained by GAI (e)the result obtained by GNE

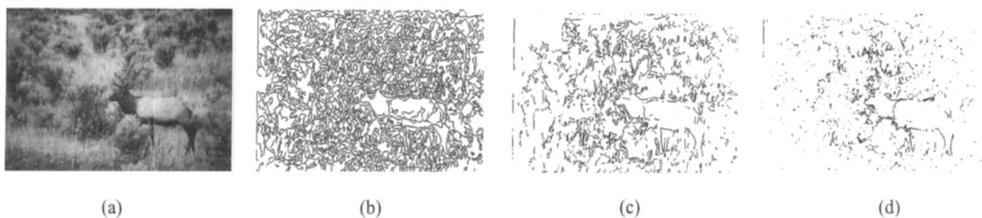


图4 复杂场景下的对比结果 (a)输入图像 (b)Canny 检测结果 (c)GAI 检测结果 (d)GNE 检测结果  
Fig.4 The comparing results in a complicated scene (a)input image (b)the result obtained by Canny (c)the result obtained by GAI (d)the result obtained by GNE

如图 4(a)所示,图像所表达的内容较复杂,以至于人眼很难准确地识别出 Bulk 的轮廓,尤其在鹿角和头部位置的检测更加困难。通过对比可以看出,Canny算子的检测结果完全无法识别图像所表达的内容,复杂的纹理使得检测结果杂乱无章,Bulk 的轮廓信息完全被掩盖在纹理信息中;虽然 GA 算子得到较好的输出结果,但是仍然有许多无用信息妨碍整体的识别。相比之下,尽管 Bulk 的轮廓并没有完全被检测出来,但所提的 GNE 算法得到了更好的轮廓信息,其主要的轮廓清晰可见,头部区域也较易辨认。

上述实验说明,对于复杂自然场景下的目标检测任务,Canny算子和 GA 算法的检测结果显示较多的假边缘,使得细节较差而影响检测的效果;但加入邻域影响因子的 GNE 检测模型可以很好地抑制这些干扰信息并增强同结构的轮廓,使得检测结果较理想。通过大量的仿真实验发现,场景越复杂,其它两种算法的检测结果越差。所提算法与之相比的优势越明显。

### 3 结论与展望

本文提出了一种新颖的基于生物视觉感知的轮廓检测算法。首先,通过建立细胞的响应函数来模拟细胞对外界刺激的反应。然后,在充分考虑邻域神经元与中心神经元间距离、相对位置、最佳朝向角度之

间差异的影响下,提出了一种新的邻域影响因子,将其与二维 Gabor 能量函数结合得到轮廓检测模型,与 Canny 和 CA 算法相比,使用本文的算法检测的轮廓更加清晰,且更易抑制背景中的纹理。尽管与期望输出相比,还存在一定差距,但与其它算法相比该算法具有更好的检测准确性和稳定性,且更容易实现。当待测图片的场景复杂时,所提算法的优势更加明显。

### REFERENCES

- [1] GUO Wei, ZHAO Yi-Gong, XIE Zhen-Hua, *et al* New method for cloud description and dim small infrared target detection based on nonparametric statistics[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭伟,赵亦工,谢振华,等.基于非参数统计的云层背景描述与红外弱小目标检测.红外与毫米波学报), 2008, 27(5): 383—387.
- [2] XU Rong-Ping, YANG Lei. Small target tracking approach combined the merits of two tracking frameworks under infrared complex background[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐蓉萍,杨磊.红外复杂背景中一种融合两类跟踪框架优点的小目标跟踪算法.红外与毫米波学报), 2008, 27(5): 354—360.
- [3] Kruijinga P, Petkov N. Nonlinear operator for oriented texture[J]. *IEEE Transactions on Pattern Image Processing*, 1999, 8(10): 1395—1407.
- [4] SANG Nong, TANG Qi-Ling, ZHANG Tian-Xu. Contour detection based on inhibition of primary visual cortex[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (桑农,唐奇伶,张天序.基于初级视皮层抑制的轮廓检测方法.红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 47—60.
- [5] Tang Q, Sang N, Zhang T. Contour detection based on con-

- textual influences[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, **25**(8): 1282—1290
- [6] Jones J P, Palmer L A. An evaluation of the two dimensional Gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1987, **58**: 1233—1258
- [7] DeVabis R L, Albrecht D G, Thorell L G. Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex[J]. *Vision Research*, 1982, **22**: 545—559
- [8] Tan T N. Texture edge detection by modeling visual cortical channels[J]. *Pattern Recognition*, 1995, **28**(9): 1283—1298
- [9] Abdou I E, Pratt W K. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors[C]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, **69**(5): 753—763

(上接 352页)

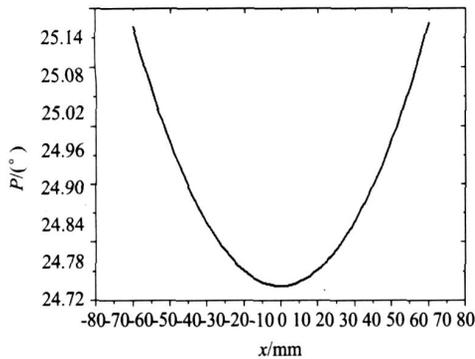


图 4 电场相位变化曲线

Fig 4 Absolute change of the phase

图 4 可以看出,引入介质后,相位变化量的最大起伏为  $0.41^\circ$ 。图中电场幅度和相位的变化关于零点基本是对称的,因此电磁波的指向为  $x$  轴,与红外波束指向一致。

### 3 结论

根据红外/毫米波复合系统要求红外目标与毫米波目标来波方向一致的特点,基于波的折射定律、反射定律和抛物面天线的性质,将几何光学法与遗传算法相结合,提出了一种对透射毫米波信号、反射红外信号的介质的形状进行优化的方法。利用电磁仿真软件进行了仿真验证,仿真结果表明,采用该方法设计的共口径目标模拟器,介质对毫米波的相位

分布影响很小,毫米波信号与红外信号具有良好的指向一致性。该方法对提高红外/毫米波目标模拟器性能具有重要意义。

### REFERENCES

- [1] Lev Sadovnik. Infrared/millimeter wave beam combiner utilizing holographic optical element[C]. *SPIE conference on optical analogies in microwave/millimeter wave*, 1998, **3464**: 155—163.
- [2] Peng Xiao-Yuan. *System simulation technique*[M]. Beijing: Beijing aeronautics and astronautics Press(彭晓源. 系统仿真技术. 北京:北京航空航天大学出版社), 2006: 154—156.
- [3] LUAN Hui, ZHAO Kai. Error analysis and accuracy validation of two-point calibration for microwave radiometer receiver[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(栾卉,赵凯. 微波辐射计接收机两点定标法误差分析及准确性验证. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(4): 289—292.
- [4] WANG Li-Hui, YU Yun-Jian, LU Duan-Jun. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(王立辉, 郁蕴健, 陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计. 红外与毫米波学报), 2008, **27**(1): 39—41.
- [5] Lin Chang-Lu. *Modem antenna design*[M]. Beijing: Posts and Telecom Press(林昌禄. 近代天线设计. 北京:人民邮电出版社), 1987: 472—474.
- [6] Cheng Yong. Design and optimization method for a new type dielectric lens[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*(程勇. 一种新型介质透镜的优化设计方案. 南京邮电学院学报), 2001, **21**(2): 28—32.
- [7] Johnson J M, Rahmat-Samii Y. Genetic algorithm in engineering electromagnetics[J]. *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, 1997, **39**(4): 7—21.