

一种基于颜色拮抗感受野的轮廓检测模型

吴璟莉^{1,2} 刘袁静²

(广西师范大学广西多源信息挖掘与安全重点实验室 桂林 541004)¹

(广西师范大学计算机科学与信息工程学院 桂林 541004)²

摘要 轮廓检测在目标识别、图像分割和模式识别等图像分析领域有着非常重要的意义。根据视觉的生物学原理,研究人员已提出了针对灰度图像的轮廓检测方法,并取得了较好的检测结果。但是,颜色信息可以表示出图像的大部分信息,在轮廓检测中发挥的作用不可忽视。杨开富等人提出的 CO 模型可以较好地提取图像中的目标轮廓,但该模型的计算效率还有待提高。文中提出一种轮廓检测模型 CRFM(Color-opponent Receptive Field Model),该模型依据视觉信息处理机制,分别模拟视网膜神经节细胞和外侧膝状体细胞感受野的响应。此外,CRFM 采用两个不同尺度的高斯偏导函数之差来模拟初级视皮层细胞的颜色双拮抗感受野响应,拟合视觉特征,且由于模拟双拮抗感受野的滤波器通常产生较小的数值,因此加快了其与图像信息卷积的计算速度,降低了运行开销。利用 BSDS300 数据库的图像进行实验,结果表明,CRFM 模型能够获得较好的轮廓检测效果,且具有较 CO 模型更高的执行效率,具有较好的实用性。

关键词 感受野,轮廓检测,颜色拮抗,模型

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.059

Contour Detection Model Based on Color Opponent Receptive Field

WU Jing-li^{1,2} LIU Yuan-jing²

(Guangxi Key Lab of Multi-source Information Mining & Security, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)¹

(College of Computer Science and Information Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)²

Abstract It is very significant for contour detection to be widely used in such fields as target recognition, image segmentation and pattern recognition, etc. According to the principle of visual biology, researchers put forward contour detection methods for gray image, which achieved good results. However, the color information can represent most of the image information, and the role of it cannot be ignored when detecting contour. The CO model proposed by Kaifu Yang can extract the target contour from the image, but the execution efficiency of the model still need to be improved. In this paper, a contour detection model CRFM (Color-opponent Receptive Field) was proposed. According to visual information processing mechanism, the model simulates the response from receptive field of the retinal ganglion cells and the one from the lateral geniculate nucleus cells respectively. In addition, CRFM uses the partial derivative difference between two Gaussian functions having different scales to simulate the response of the double opponent receptive field in the primary visual cortex and the visual characteristics. Because the filter, which simulates the double opponent receptive field, usually produces small value, the speed is improved for computing the convolution between the filter and the image information, and the execution cost is decreased. BSDS300 database was used in the experiments. Results show that the CRFM model can obtain better performance, and has higher execution efficiency than the CO model which is very practical in realistic application.

Keywords Receptive field, Contour detection, Color opponent, Model

1 引言

边缘检测^[1]是目标识别、图像分割等图像处理工作的必要基础与前提,其准确度对于图像压缩、模式识别、工业检测、

人脸识别等依赖于物体关键特征与轮廓的应用有着重要的影响。随着图像处理应用的不断深入和发展,研究发现轮廓更能描述图像中目标的形状信息^[2,3],轮廓检测应运而生。在图像中,轮廓与边缘有所不同,那些连续体现主体目标的边缘

到稿日期:2015-06-01 返修日期:2015-09-06 本文受国家自然科学基金项目(61363035, 61272535), 广西自然科学基金项目(2015GXNSFAA139288, 2013GXNSFBA019263), “八桂学者”工程专项, 广西多源信息挖掘与安全重点实验室系统性研究基金项目(14-A-03-02), 广西区域多源信息集成与智能处理协同创新中心资助。

吴璟莉(1978-), 女, 博士, 教授, 主要研究领域为生物信息学、进化计算, E-mail: wjlhappy@mailbox.gxnu.edu.cn; 刘袁静(1987-), 女, 硕士生, 主要研究领域为图像处理。

是轮廓,而那些复杂背景所产生的纹理边缘信息则不是轮廓。由于大多数图像均含有噪声等背景信息的干扰,有效地提取主体的轮廓,尤其是达到检测准确率高、定位精确的要求非常困难。

人类的视觉系统是最好的图像处理系统,能够使我们看到五彩缤纷的世界。基于这个思路,研究者们开始基于视觉信息处理机制进行图像处理,结合神经生理学和脑科学研究,构建了模拟生物视觉信息处理的感受野结构和特性的模型。1946年,匈牙利科学家 Gabor 提出 Gabor 函数^[4]来描述经典感受野,模拟感受野的朝向选择、带通等响应特性。1962年,Hubel 等提出初级视皮层神经元感受野具有朝向选择的特性,同时发现视皮层中相邻神经元感受野对外界刺激具有相似的朝向选择性^[5]。1965年,Rodieck^[6]发现感受野呈同心圆拮抗的结构,提出经典感受野模型。1980年,Marcelja^[3]把一维的 Gabor 函数推广到二维,并指出二维 Gabor 函数可以很好地模拟初级视皮层简单细胞经典感受野的响应特性。1992年,李朝义^[7]发现非经典感受野的特性,为视觉处理机制解决图像处理等问题提供了新的思路。2003年,Grigorescu 等^[8]利用非经典感受野对经典感受野的抑制特性实现图像中主体目标轮廓检测和纹理边缘的抑制。该模型虽然提高了轮廓检测效果,但会将一部分主体轮廓抑制掉,从而影响检测结果;此外,该模型不能准确地体现非经典感受野的结构特性。针对这个问题,2007年,唐奇伶等人^[2]提出一个蝶形抑制模型,包括侧区抑制和端区易化,提高了轮廓提取的完整性。为了体现颜色信息在轮廓检测中的重要性,2013年,杨开富等^[9]提出 CO 模型,该模型利用颜色拮抗原理提取图像中的目标轮廓,取得了很好的检测效果,但该模型的计算效率仍有待于提高。

本文通过对人类视觉信息处理机制中初级视皮层细胞的双拮抗感受野特性进行研究和模拟,提出一种新的数学方法模拟其特性以进行轮廓检测,提高了轮廓检测效果。与其他基于视觉机制的轮廓检测方法相比,该模型能够获得较好的轮廓检测效果,且具有更高的执行效率。

2 模型的生物学原理

由视觉生理学可知,视觉信息传递主要是从视网膜开始,经过视神经、视交叉、外侧膝状体,最后到达视皮层。人类有短(S)、中(M)、长(L) 3种视锥细胞,其分别对偏向于蓝、绿、红3种颜色的光谱敏感,这即为 RGB 三基色理论的神经生物学基础^[10,11];对颜色敏感的神经节细胞接收视锥细胞传递的3种颜色信号,经过视网膜初步处理后,视网膜神经节细胞以拮抗的形式响应。它们对分离亮度和颜色信息起重要作用。这就是拮抗颜色空间,被认为是颜色信息加工的基础,主要分为红绿拮抗和蓝黄拮抗^[12,13];与视网膜神经节细胞类似,外侧膝状体细胞的感受野也具有中心外周拮抗的同心圆结构,呈现类似的功能特性,也具有处理颜色信息的单拮抗感受野可以获得颜色区域感知^[12,14,15]。外侧膝状体细胞的单拮抗感受野主要包括以下两种类型:中心-周边拮抗感受野(图1(a)、(b))和中心拮抗感受野(图1(c)、(d));通过外侧膝状体,视觉信息被传递到视觉皮层(Visual Cortex)以完成最后的处理。研究表明,初级视皮层(V1区)存在部分细胞具有双拮抗

感受野,它既对颜色拮抗又对空间拮抗,同时对亮度和颜色信息敏感,且具有朝向选择性,对于轮廓检测起到重要作用^[10,13,15,16]。V1区细胞的双拮抗感受野的两种结构如图2所示,图2(a)和图2(c)是视网膜锥细胞在输入权重相等时的双拮抗感受野结构,图2(b)和图2(d)是视网膜锥细胞在输入权重不相等时的双拮抗感受野结构。

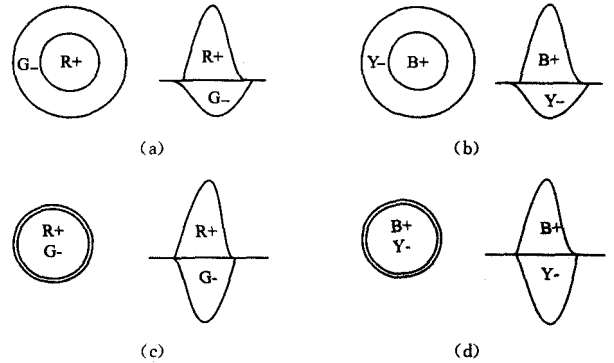


图1 外侧膝状体细胞的单拮抗感受野结构类型

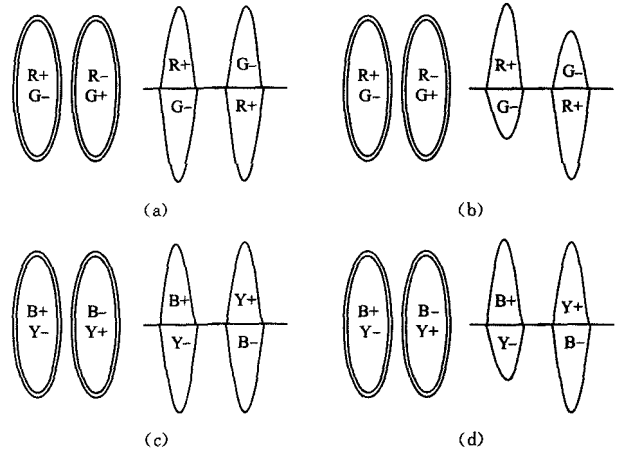


图2 V1区细胞的双拮抗感受野结构简化图

综上所述,视觉系统中的这两个颜色拮抗通道沿视网膜、外侧膝状体、初级视皮层这个通路传递信息。本文模型即依据视觉机制处理信息的顺序,对自然图像进行轮廓检测。

3 计算模型的实现

本文基于颜色双拮抗感受野的视觉机制,提出了轮廓检测方法(Color-opponent Receptive Field Model, CRFM)。该方法按照视觉机制对输入的图像信息依次进行处理,处理过程分为以下3层:首先,对输入的原始图像,模拟视网膜层的视锥细胞接收来自图像的红、绿、蓝3种颜色视觉信号,并提取4个颜色通道信息;其次,模拟外侧膝状体层细胞,接收视网膜层神经节细胞响应作为输入,以颜色拮抗的方式分别计算红-绿通道和蓝-黄通道的单拮抗响应;最后,在初级视皮层中,模型使用两个不同尺度的高斯偏导函数之差模拟细胞双拮抗感受野,将其作为滤波器提取每个颜色拮抗通道的各个

朝向的轮廓信息,随后求出每个颜色通道上所有方向的最大响应。该模型的计算流程如图3所示。下面给出各层模拟的详细描述。

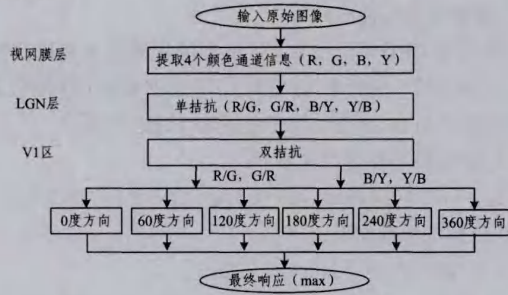


图3 CRFM模型

3.1 视网膜层

一幅图像映射到视网膜层锥细胞时,根据不同波段的信息(红、绿、蓝)形成不同的传导电信号输出。这些电信号即为视锥细胞响应敏感度,用来描述颜色信息的输出。CRFM模型首先提取图像的3个颜色分量,分别用 $R(x, y)$, $G(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 表示红、绿、蓝颜色分量。黄色分量是一个合成分量,即 $Y(x, y) = (R(x, y) + G(x, y)) / 2$ 。这样就得到 R, G, B, Y 4个颜色通道信息。

3.2 外侧膝状体(LGN)层

LGN细胞接收视网膜神经节细胞响应作为输入,并以单拮抗的方式输出响应。CRFM模型中,将不同的颜色信息进行差运算来获得颜色单拮抗。如式(1)一式(4)所示, $Srg(x, y)$, $Sgr(x, y)$, $Sby(x, y)$ 和 $Syb(x, y)$ 依次表示红/绿、绿/红、蓝/黄和黄/蓝单拮抗细胞的响应。

$$Srg(x, y) = t_1 \cdot R(x, y) - t_2 \cdot G(x, y) \quad (1)$$

$$Sgr(x, y) = t_1 \cdot G(x, y) - t_2 \cdot R(x, y) \quad (2)$$

$$Sby(x, y) = t_1 \cdot B(x, y) - t_2 \cdot Y(x, y) \quad (3)$$

$$Syb(x, y) = t_1 \cdot Y(x, y) - t_2 \cdot B(x, y) \quad (4)$$

其中, t_1, t_2 表示锥细胞输入权重, $0 \leq t_1, t_2 \leq 1$ 。若 $|t_1| = |t_2|$,亮度信息不响应; $|t_1| \neq |t_2|$,亮度和颜色信息都有响应。

3.3 初级视皮层(V1区)双拮抗感受野

图像信息通过LGN层处理,被传递到初级视皮层。初级视皮层的一些细胞具有双拮抗感受野,它们同时对亮度和颜色信息敏感,即同时对颜色和空间拮抗,且具有朝向选择特性,在轮廓检测任务中发挥很大的作用。在V1区,CRFM模型首先利用函数 $ORF(x, y, \theta)$ 模拟具有朝向性的V1区细胞的双拮抗感受野:

$$ORF(x, y, \theta) = \left| \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{y})}{\partial \bar{x}} \right| - \left| \frac{\partial g(\bar{x}, \bar{y})}{\partial \bar{x}} \right| \quad (5)$$

$$f(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

$$g(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(k\sigma)^2}} \exp\left(-\frac{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}{2(k\sigma)^2}\right) \quad (7)$$

其中, $\bar{x} = x \cos\theta + y \sin\theta$, $\bar{y} = -x \sin\theta + y \cos\theta$; $f(\bar{x}, \bar{y})$ 和 $g(\bar{x}, \bar{y})$ 表示两个不同尺度的高斯函数; γ 表示高斯空间比率,它控制着感受野的椭圆率; $\theta \in [0, 2\pi]$ 表示给定细胞的最优方向; $k\sigma$ 决定着V1区神经元感受野的大小。图4给出了 $ORF(x, y, \theta)$ 函数模拟V1区细胞6个朝向($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ,$

$240^\circ, 300^\circ$)的双拮抗感受野示意图。

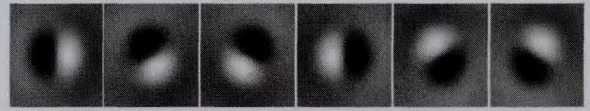


图4 双拮抗感受野6个朝向的模型示意图

其次,CRFM模型将双拮抗感受野作为滤波器,与外侧膝状体层输出的图像信息卷积,以获得每个颜色拮抗通道所有朝向的轮廓信息。如式(8)一式(11)所示, $DOrg(x, y, \theta_i)$, $DOgr(x, y, \theta_i)$, $DOby(x, y, \theta_i)$, $DOyb(x, y, \theta_i)$ 依次表示红/绿、绿/红、蓝/黄、黄/蓝拮抗通道内各个朝向上的轮廓响应。

$$DOrg(x, y, \theta_i) = \sum_x \sum_y Srg(x+x', y+y') \cdot ORF(x', y', \theta_i) \quad (8)$$

$$DOgr(x, y, \theta_i) = \sum_x \sum_y Sgr(x+x', y+y') \cdot ORF(x', y', \theta_i) \quad (9)$$

$$DOby(x, y, \theta_i) = \sum_x \sum_y Sby(x+x', y+y') \cdot ORF(x', y', \theta_i) \quad (10)$$

$$DOyb(x, y, \theta_i) = \sum_x \sum_y Syb(x+x', y+y') \cdot ORF(x', y', \theta_i) \quad (11)$$

其中, x', y' 表示颜色拮抗感受野区域,即滤波器的大小; $\theta_i \in [0, 2\pi]$ 表示滤波器的不同方向,用来提取不同朝向的轮廓信息,其计算方法如式(12)所示:

$$\theta_i = 2\pi(i-1)/n, i=1, 2, \dots, n \quad (12)$$

然后,计算每个颜色通道所有方向下的最大值,得到对应通道的最终轮廓响应,如式(13)一式(16)所示, $rg(x, y)$, $gr(x, y)$, $by(x, y)$, $yb(x, y)$ 分别表示红/绿、绿/红、蓝/黄、黄/蓝拮抗通道的最终轮廓响应:

$$rg(x, y) = \max\{DOrg(x, y, \theta_i) | i=1, 2, \dots, n\} \quad (13)$$

$$gr(x, y) = \max\{DOgr(x, y, \theta_i) | i=1, 2, \dots, n\} \quad (14)$$

$$by(x, y) = \max\{DOby(x, y, \theta_i) | i=1, 2, \dots, n\} \quad (15)$$

$$yb(x, y) = \max\{DOyb(x, y, \theta_i) | i=1, 2, \dots, n\} \quad (16)$$

接着,合并红/绿、绿/红、蓝/黄、黄/蓝通道的轮廓图,计算它们的最大值,即得到输入图像的最终轮廓响应,如式(17)所示:

$$Edge(x, y) = \max\{rg(x, y), gr(x, y), by(x, y), yb(x, y)\} \quad (17)$$

最后,为了方便处理后数据,将得到的最终轮廓图按照式(18)进行归一化处理:

$$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (18)$$

其中, X 表示当前像素值, X' 表示归一化后的像素值, X_{\max} 为图像中像素的最大值, X_{\min} 为图像中像素的最小值。

4 实验结果与分析

本文选取当前主流的模拟视觉机制的CO模型与CRFM模型进行对比分析,使用C#语言在Microsoft Visual Studio 2010开发平台下实现了CRFM模型和CO模型^[9],在一台安装了Windows 7操作系统的IBM工作站(Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q9550 2.83GHz,内存为4.0GB)上对这两个模型进行比较分析。为了进一步确定图像轮廓位置并方

便定量地对比结果,采用广泛运用的轮廓图像后处理过程(非极大值抑制和双阈值处理)^[8,17]对模型轮廓响应进行细化和二值化。

4.1 评价标准

实验图像来自于加州大学伯克利分校轮廓检测数据库(Berkeley Segmentation Data Set, BSDS300)^[18]中的原始自然图像和标准轮廓图像。每幅原始自然图像均带有5到10张不等的手绘图像标准轮廓结果(Ground Truth),将模型检测到的轮廓同每个标准轮廓作比较,并取其平均准确率作为检测结果。

本文采用 Grigorescu 等^[8]提出的一种定量估计方法来检测算法性能。令 E_{GT} 表示标准轮廓图中轮廓像素的集合, E_D 表示待评价模型提取的轮廓, E 表示标准轮廓图和待评价模型提取轮廓的交集,即 $E = E_{GT} \cap E_D$; 令 B_D 为待评价模型检测到的背景像素,则没有被检测到的轮廓像素集合 $E_{FN} = E_{GT} \cap B_D$; 令 B_{GT} 表示标准轮廓中的背景像素, E_{FP} 定义为不是标准轮廓的像素而被待评价模型检测出来的像素点,即 $E_{FP} = E_D \cap B_{GT}$ 。

Grigorescu 评价方法由错检率 e_{fp} 、漏检率 e_{fn} 和准确率 P 3部分组成^[8]。根据上述定义,准确率 P 被定义为正确检测出来的轮廓与所有检测出来的像素的比,如式(19)所示,其值反映了轮廓检测算法的整体性能:

$$P = \text{card}(E) / (\text{card}(E) + \text{card}(E_{FP}) + \text{card}(E_{FN})) \quad (19)$$

其中, $\text{card}(x)$ 表示集合 x 中的元素数目。此外,错检率 e_{fp} 和

漏检率 e_{fn} 分别定义如下:

$$e_{fp} = \text{card}(E_{FP}) / \text{card}(E) \quad (20)$$

$$e_{fn} = \text{card}(E_{FN}) / \text{card}(E_{GT}) \quad (21)$$

4.2 实验结果与性能分析

本文对 CRFM 模型和 CO 模型的检测效果和检测时间进行比较分析。实验中,分别对 CRFM 模型和 CO 模型设置不同的参数组合,并选取最优结果进行对比分析。

CRFM 模型参数设置如下:

$$t_1 = 1, t_2 = 0.6, \gamma = 1, k = 0.5, n = 6, \sigma = [1.5, 2, 2.5]$$

CO 模型参数如下:

$$k = 2, N = 6, \sigma = [1, 1.5, 2, 2.5, 3]$$

在非极大值抑制和双阈值处理过程中,设置高阈值 Th 和低阈值 Tl ,其中 $Tl = p \cdot Th$,参数 $p = \{0, 1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\}$ 。

图5给出 CRFM 和 CO 模型对 BSDS300 数据库中图像 42049, 3096, 253036 和 35070 的检测结果,其中图 5(a) 表示输入的原始图像,图 5(b) 表示标准轮廓图像,图 5(c) 表示 CO 模型的计算结果,图 5(d) 表示 CRFM 模型的计算结果,其对应参数设置以及性能指标如表 1 所列。

从表 1 中的数据可以看出,CRFM 模型能够较好地提取图像的轮廓。该模型通过模拟视网膜锥细胞对颜色的敏感响应、外侧膝状体细胞的颜色拮抗响应以及初级视皮层中细胞的双拮抗感受野响应,对从视网膜层到 LGN 层再到 V1 区的红绿和蓝黄两个颜色拮抗信息的处理,实现了较好的轮廓检测效果。

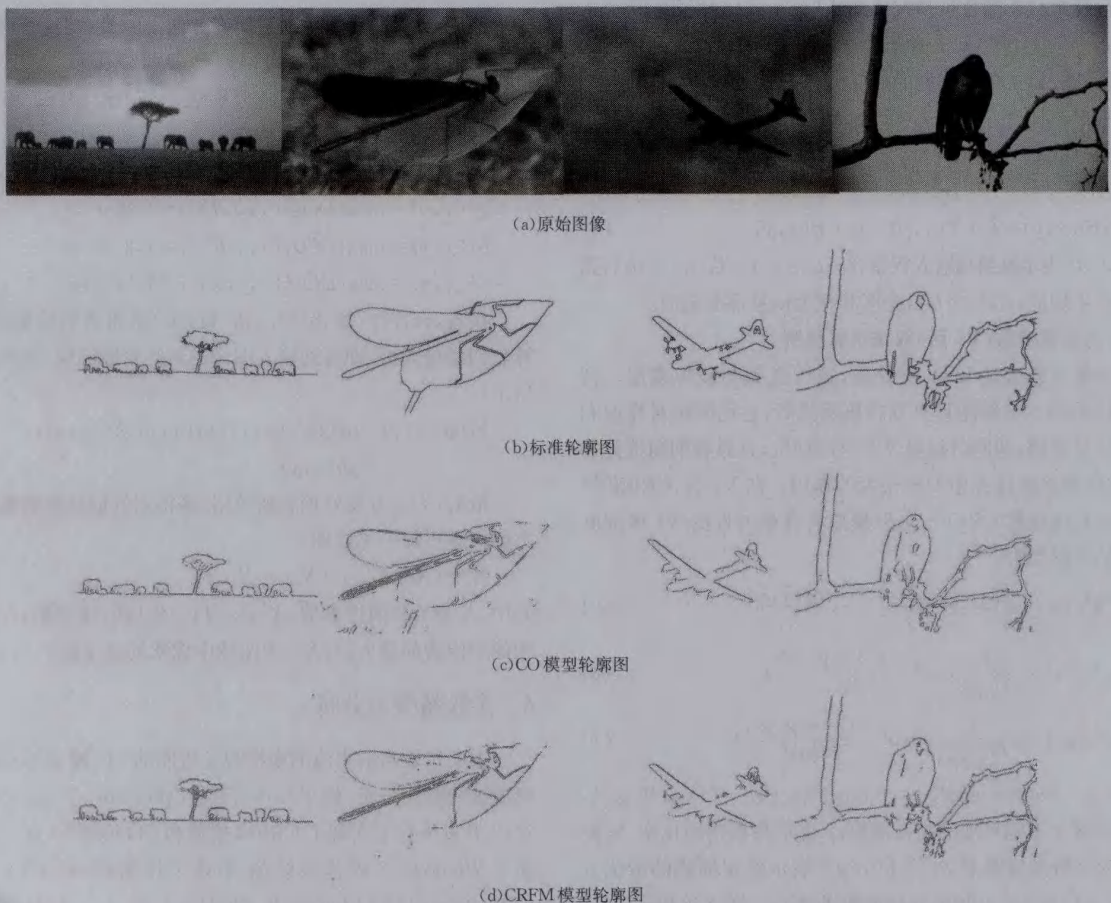


图5 模型提取轮廓的比较

表 1 轮廓提取结果比较

图像	模型	参数		性能指标		
		σ	ρ	c_{fp}	c_{fn}	P
42049	CRFM	2	0.2	0.52	0.07	0.62
	CO	1.5	0.2	0.55	0.09	0.60
3096	CRFM	2	0.2	0.52	0.28	0.51
	CO	1.5	0.1	0.68	0.26	0.51
253036	CRFM	2	0.1	0.45	0.08	0.65
	CO	1.5	0.2	0.47	0.11	0.62
35070	CRFM	2	0.1	0.68	0.13	0.55
	CO	1.5	0.2	0.75	0.09	0.52

表 2 对 CRFM 模型和 CO 模型的运行效率进行比较。

表 2 运行时间比较(s)

图片 模型 时间	3096	35070	41004	42049	101087	118035	124084	135069	189080	253055	296059	302003	302008	317080
CO	4.60	5.9	6.3	4.60	4.5	5.91	6.13	6.36	4.91	4.84	4.78	6.20	4.84	6.23
CRFM	3.68	3.79	3.90	3.77	3.55	3.60	3.94	3.91	3.79	3.94	3.89	3.97	3.83	3.98

结束语 本文基于颜色拮抗感受野的视觉机制,提出一种轮廓检测方法 CRFM,该模型用两个不同尺度的高斯偏导函数的差来模拟 V1 区颜色双拮抗感受野,从而进行轮廓检测。将其与其他轮廓检测方法进行实验对比,结果显示该方法不仅可以有效地提取图像中的目标轮廓,而且比 CO 模型的运行效率更高,更实用。

目前,人们对高层视觉机制研究的认识还在不断完善,需要我们不断加深理解视觉信息处理过程,构建与人类视觉对轮廓提取结果更接近的模型。CRFM 提取到的轮廓有些地方有间断点,需要进一步研究。

参考文献

[1] Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences, 1980, 207(1167):187-217

[2] Tang Qi-ling, Sang Nong, Zhang Tian-xu. Extraction of salient contours from cluttered scenes[J]. Pattern recognition, 2007, 40(11):3100-3109

[3] Marcelja S. Mathematical description of the responses of simple cortical cells [J]. JOSA, 1980, 70(11):1297-1300

[4] 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(6):1233-1258

[5] Smyth D, Willmore B, Baker G E, et al. The receptive-field organization of simple cells in primary visual cortex of ferrets under natural scene stimulation[J]. The Journal of Neuroscience, 2003, 23(11):4746-4759

[6] Rodieck R W, Stone J. Analysis of receptive fields of cat retinal ganglion cells[J]. Journal of Neurophysiology, 1965, 28(5):833-849

[7] Li Chao-yi. Integration fields beyond the classical receptive field: organization and functional properties [J]. Physiology, 1996, 11(4):181-186

表中给出了 BSDS300 图像数据库中 14 幅图像的名称以及两种模型对这些图像的处理时间。在 CRFM 模型中,模拟双拮抗感受野的滤波器通常产生的数值较小,这使其与图像信息卷积时能获得更快的计算速度,从而降低了运行开销。

本文的轮廓检测方法通过模拟视网膜、外侧膝状体以及初级视皮层中颜色拮抗感受野的特性,建立了符合视觉机制的轮廓检测方法。实验结果表明,所提出的 CRFM 模型能获得高于 CO 模型的轮廓准确率,且具有更高的检测效率。因此,CRFM 模型具有更强的实用性。

[8] 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

[9] Yang Kai-fu, Gao Shao-bing, Li Chao-yi, et al. Efficient color boundary detection with color-opponent mechanisms[C]//2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2013:2810-2817

[10] Kaiser P K, Boynton R M. Human color vision[J]. Optical Society of America, 1996, 8(6):50-94

[11] Conway B R, Chatterjee S, Field G D, et al. Advances in color science: from retina to behavior [J]. The Journal of neuroscience, 2010, 30(45):14955-14963

[12] Koenderink J J, Van de Grind W A, Bouman M A. Opponent color coding: A mechanistic model and a new metric for color space[J]. Kybernetik, 1972, 10(2):78-98

[13] Solomon S G, Lennie P. The machinery of colour vision[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2007, 8(4):276-286

[14] Derrington A M, Krauskopf J, Lennie P. Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque [J]. The Journal of Physiology, 1984, 357(1):241-265

[15] Shapley R, Hawken M J. Color in the cortex: single-and double-opponent cells[J]. Vision research, 2011, 51(7):701-717

[16] Shapley R, Hawken M. Neural mechanisms for color perception in the primary visual cortex[J]. Current opinion in neurobiology, 2002, 12(4):426-432

[17] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(6):679-698

[18] Martin D, Fowlkes C, Tal D, et al. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics [C] // Eighth IEEE International Conference on Computer Vision, 2001 (ICCV 2001). IEEE, 2001:416-425