

基于人眼视觉注视机制下突触短时可塑性的图像边缘检测算法

潘 晴 严国萍 张玉宽

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

摘 要 根据人眼视觉在外界刺激下引发神经细胞突触短时程可塑效应而造成感受野结构发生形变的生理现象, 对视觉感受野的形变方式进行了假设, 在研究了形变后感受野模型长轴和边缘方向的夹角对滤波效果影响曲线的基础上, 提出了一种新的高通滤波算法。通过实验验证了该算法在高通滤波效果和实时性能方面的优越性和文中假设的合理性。结果表明, 该算法更加适合于对人眼视觉注视机制的描述。

关键词 突触短时可塑性 注视机制 高通滤波

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)07-1316-06

An Edge Detection Algorithm Based on Short-term Synaptic Plasticity in Gazing Mechanism in HVS

PAN Qing, YAN Guo-ping, ZHANG Yu-kuan

(Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract According to the mechanism that the Short-term Synaptic Plasticity caused by repeating stimulation can lead to distortion in receptive fields of neurons in human vision system, a hypothesis on the manner of distortion in receptive fields is proposed in this paper. The influences of the angle of edge's orientation and the distorted receptive fields' long axes on the filtering performance have been studied. Based on the analysis of the curve, a new high-pass filtering algorithm is put forward. The experiments confirm the superiority of the algorithm in filtering performance and in real-time processing. And the hypothesis mentioned above is proved to be rational in the experiments. The experimental results show that the algorithm is more appropriate to describe the gazing mechanism in Human vision System.

Keywords short-term synaptic plasticity, gazing mechanism, high-pass filtering

1 引言

生物视觉对外界物体的观察过程在于首先将所提取的外界物体的边缘轮廓送入大脑中, 大脑根据经验对轮廓进行填充, 从而达到“看到”物体的效果, 研究生物视觉如何提取物体的轮廓成为近年来的研究热点。感受野作为生物视觉的基本现象, 主要用于图像边缘特征提取。近 30 年来, 人们以生物

实验数据为基础对其提出了很多的数学模型^[1-3], 并揭示出视觉感受野的形状类似于高斯函数与拉普拉斯变换之和^[4,5]。

视觉生理理论和大量实验表明人眼在观察景物时具有方向选择性, Campbell 和 Kulikowski 的结论表明人类的视觉感知系统对水平或垂直方向的光强变化感知最大, 而对于斜向方向的光强变化感知最小^[6]。龙公等人在此基础上提出了一种具有方向选择性和变尺度的特征检测算子^[7], 克服了 LOG 算

基金项目: 航天支撑技术基金项目(03 1.3 JW05)

收稿日期: 2006-09-11; 改回日期: 2007-01-23

第一作者简介: 潘 晴(1975 ~), 男, 讲师。2007 年于华中科技大学电子与信息工程系获通信与信息系统专业博士学位。主要研究方向为图像处理、自动目标识别、光纤通信。E-mail: qpan_r108@163.com

子中对视觉解释的不完善。而对于“当人眼长时间地注视某一物体时,能清楚地观察到几乎所有细节”这种视觉注视机制,被解释为当人眼集中于某一方向的特征时,这一方向的亮度变化在感受野中会得到加强,但文献[7]中只是简单地把它归结为在视觉高级层次中完成的机理。王怀野等人也提出了一种方向性、变尺度的各向异性高斯滤波器的设计方法^[8],滤波器的长轴方向由所在位置的灰度值梯度方向决定,虽然能得到更清晰的滤波效果,但需要实时生成滤波器模板,极大地降低了该算法的实时性能。

本文根据神经细胞在外界的刺激下产生突触的短时程可塑效应使得感受野发生形变这一生理机制,首先对在外界刺激下,感受野的形变方式提出了假设,并提出了一种新的自适应高通滤波算法。

2 感受野变形假设

突触分布于神经细胞周围,是神经系统内进行信息传递的结构基础。神经系统内的神经元之间的信息传送则必须通过突触;由于突触结构与功能的复杂性,在传送信息的过程中突触本身的结构和功能会发生变化,将突触在其结构以及功能方面的可变性称为突触可塑性^[9]。由于在学习记忆和神经系统发育中的重要作用,突触的长时程可塑性(包括长时程增强(LTP)和长时程压抑(LTD))近 30 年来一直备受人们关注^[10]。

近年来,另一种形式的突触可塑性——突触的短时程可塑性也越来越成为各国神经科学家们关注的焦点^[9,11],视觉通路上的突触短时程可塑性导致感觉适应,并且能改变高级神经元的感受野结构特

征^[9],此外对脊髓背角神经元的外周感受野不断地刺激实验也能表明这一观点^[12]。由此可以就外部刺激条件下视觉感受野形变方式作出如图 1 所示的假设:

图 1 表示在外界刺激的不同阶段,感受野模型 $x-y$ 平面上的投影形状。图 1(a)表示初始状态下感受野,可用下式所示的各向同性 LOG 算子表示:

$$\nabla^2 G_D(x,y) = K \left(2 - \frac{(x^2 + y^2)}{\delta^2} \right) \times \exp \left[- \frac{(x^2 + y^2)}{2\delta^2} \right] \quad (1)$$

式中, K 为比例常数, δ 为该模型在各个方向上选取的尺度。外界刺激下感受野发生形变如图 1(b),可用任意方向上的各向异性 LOG 算子描述:

$$\nabla^2 G_D(x,y) = K \left(2 - \left(\frac{(x \cos \theta + y \sin \theta)^2}{\delta_u^2} + \frac{(y \cos \theta - x \sin \theta)^2}{\delta_v^2} \right) \right) \exp \left[- \left(\frac{(x \cos \theta + y \sin \theta)^2}{2\delta_u^2} + \frac{(y \cos \theta - x \sin \theta)^2}{2\delta_v^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中, K 为比例常数, δ_u 和 δ_v ($\delta_u > \delta_v$) 分别为在 u 和 v 方向上选取的不同的尺度 ($\delta_u + \delta_v \approx 2\delta$), θ 为 u 方向与 x 轴的夹角。在持续的外界刺激下,感受野模型最终变成在某个方向上的线型滤波器模型,如图 1(c) 所示,用下式描述:

$$\begin{cases} \nabla^2 G_D(x,y) = K \left(2 - \frac{(x^2 + y^2)}{\delta_1^2} \right) \exp \left[- \frac{(x^2 + y^2)}{2\delta_1^2} \right] \\ y = x \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

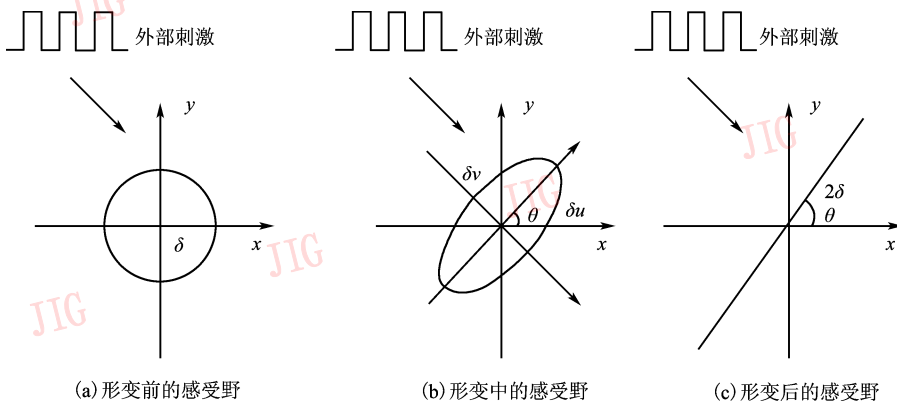


图 1 感受野形变假设图

Fig. 1 The hypothetic chart of the distortion in receptive fields

式中, K 为比例常数, θ 为线型滤波器所在的方向与 x 轴的夹角, δ_1 为线型滤波器的尺度 ($\delta_1 \rightarrow 0$)。

3 理论分析

人眼视觉长时间地注视外界可以理解为物体边缘长时间刺激视觉感受野的过程。图像边缘中的某一小段可用阶跃函数表示:

$$S_{h,k}(x,y) = \begin{cases} h & y \leq kx \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$S_{h,k}(x,y)$ 边缘线表示为

$$L_{h,k}(x,y) = \begin{cases} h & y = kx \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

设边缘与 x 轴的夹角为 β , 其中 $k = \tan\beta$ 。为分析方便, 令式(3)中 $\theta = 0$, 式(3)变为

$$\nabla^2 G_D(x,y) = K \left(2 - \frac{x^2}{\delta_x^2} - \frac{y^2}{\delta_y^2} \right) \times \exp \left[- \left(\frac{x^2}{2\delta_x^2} + \frac{y^2}{2\delta_y^2} \right) \right] \quad (6)$$

对式(6)和式(4)求卷积得:

$$I(x,y) = \nabla^2 G_D(x,y) * S_{h,k}(x,y) \quad (7)$$

上式中原点梯度为

$$\text{grad}I = \frac{\partial I}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial I}{\partial y} \mathbf{j} \Big|_{x=0,y=0} \quad (8)$$

式(8)也可视为 β 的函数,

$$\text{grad}I = f(\beta) \mathbf{i} + g(\beta) \mathbf{j} \quad (9)$$

对式(9)求关于 β 的一阶偏导数得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\text{grad}I)}{\partial\beta} &= \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial \beta} \mathbf{i} + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial \beta} \mathbf{j} \\ &= f_1(\beta) \mathbf{i} + g_1(\beta) \mathbf{j} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)的多项式拟合为

$$\frac{\partial(\text{grad}I)}{\partial\beta} \approx \sum_{i=0}^n a_i \beta^{n-i} \mathbf{i} + \sum_{i=0}^n b_i \beta^{n-i} \mathbf{j} \quad (11)$$

式中, $\sum_{i=0}^n a_i \beta^{n-i}$ 和 $\sum_{i=0}^n b_i \beta^{n-i}$ 分别为 $f_1(\beta)$ 和 $g_1(\beta)$ 的多项式拟合表达式。对式(11)求积分, 得:

$$\begin{aligned} \text{grad}I &= \int \frac{\partial(\text{grad}I)}{\partial\beta} d\beta \\ &\approx \left(\sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \right) \mathbf{i} + \\ &\quad \left(\sum_{i=0}^n \frac{b_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_2 \right) \mathbf{j} \end{aligned} \quad (12)$$

c_1 和 c_2 分别为对 $\sum_{i=0}^n a_i \beta^{n-1}$ 和 $\sum_{i=0}^n b_i \beta^{n-1}$ 求不定积分

后所得的常数项, 由式(4)和式(5)得:

$$\sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \Big|_{\beta=0} = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n \frac{b_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_2 \Big|_{\beta=\frac{\pi}{2}} = 0 \quad (14)$$

当 $n \in \mathbf{N}$ 时, 由式(13)和式(14)求不同 n 值下的 c_1 和 c_2 , 并代入下式

$$\begin{aligned} |\text{grad}I| &= \left[\left(\sum_{i=0}^n \frac{a_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_1 \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=0}^n \frac{b_i}{n-i+1} \beta^{n-i+1} + c_2 \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

例如, 当 $n = 7$ 时, 由式(13)和式(14)得 $c_1 = 0$, $c_2 = 1.8023$, 该变化趋势如图 2 所示。

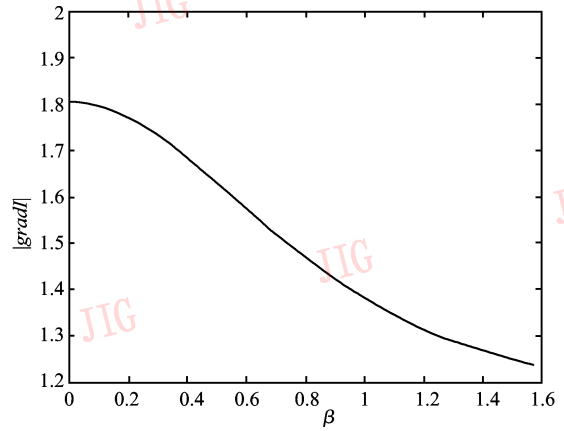


图 2 边缘亮度相对于 β 的变化趋势

Fig. 2 The brightness of edges vs β

如果感受野按照图 1 假设的方式发生形变, 则长轴方向将一直与物体边缘方向一致, 才能保证每个时刻高通滤波效果最佳。感受野最终变成沿长轴方向的线型滤波器模型, 人眼视觉的注视机制实际上是线型滤波器滤波后的效果。由此便构成了文中人眼注视机制模拟算法的思想。

4 注视机制模拟算法及其实现

算法包括图像中边缘方向角估计、角度区域的划分和自适应滤波等 3 个步骤。

4.1 图像中边缘方向角估计

对于图像中边缘方向角的估计直接采用文献[8]中的方法, 将 Gauss 函数分解为垂直和水平方向上的方向导数与图像的卷积得到图像在水平和垂直方向的梯度:

$$E_x = \frac{\partial G(x,y)}{\partial x} * I_1(x,y) \quad (16)$$

$$E_y = \frac{\partial G(x,y)}{\partial y} * I_1(x,y) \quad (17)$$

式中, $G(x,y)$ 为高斯滤波算子, $I_1(x,y)$ 为原始图像中在坐标为 (x,y) 上的灰度级, 可以采用 2×2 邻域一阶偏导的有限差分法^[13] 和 8 邻域内的一阶偏导数有限差分法^[14] 等两种方法计算 $E_x(x,y)$ 和 $E_y(x,y)$, 并根据下式计算边缘方向角

$$\theta(x,y) = \arctan\left[\frac{E_y(x,y)}{E_x(x,y)}\right] + \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

4.2 角度区域的划分

由于实际图像的边缘方向角 $\theta(x,y) \in [0, \pi]$, 需要对区域 $[0, \pi]$ 进行划分, 角度区域的划分方式主要取决于算法中将选用的模板算子大小, 设采用 $n \times n$ 大小的模板 (n 为奇数), 则该尺寸的模板在区域 $[0, \pi]$ 中将包含 $2^{\frac{n+1}{2}}$ 个方向的线型滤波器。具体的角度区域划分方法如下:

(1) 计算 $n \times n$ 模板内所能包含的所有线型滤波器的方向角, 由小到大依次为 θ_i , 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 2^{\frac{n+1}{2}}$; $\theta_1 \equiv 0$ 。

(2) 计算角度区域划分所采用的边界角, 共 $2^{\frac{n+1}{2}}$ 个, 记为 $\alpha_i = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}$, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 2^{\frac{n+1}{2}} - 1$ 。

另外, $\alpha_{2^{\frac{n+1}{2}}} = \frac{\theta_{2^{\frac{n+1}{2}}} + \pi}{2}$ 。

(3) 将角度区域 $[0, \pi]$ 划分为 $2^{\frac{n+1}{2}} + 1$ 个区, 分别记为 $A_1: [0, \alpha_1]$, $A_2: [\alpha_1, \alpha_2]$, $A_3: [\alpha_2, \alpha_3]$, \dots , $A_i: [\alpha_{i-1}, \alpha_i]$, \dots , $A_{2^{\frac{n+1}{2}}}: [\alpha_{2^{\frac{n+1}{2}}-1}, \alpha_{2^{\frac{n+1}{2}}}]$, $A_{2^{\frac{n+1}{2}}+1}: [\alpha_{2^{\frac{n+1}{2}}}, \pi]$ 。

4.3 自适应滤波

选择采用模板大小的尺度, 按上述方法对角度区域 $[0, \pi]$ 进行区域划分。计算该模板尺度下所有线型滤波器矩阵, 记为 H_i , 分别用于检测方向角为 θ_i 的边缘, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 2^{\frac{n+1}{2}}$ 。例如, 当选择 3×3 大小的模板时, 所能确定的线型滤波器模板为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2 \\ 0 & 4 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{H}_1 、 \mathbf{H}_2 、 \mathbf{H}_3 和 \mathbf{H}_4 分别为检测边缘方向角为 0 、 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 和 $\frac{3\pi}{4}$ 方向上的线型滤波器矩阵。由于通过灰度梯度法估计图像各像素点上的边缘方向角 $\theta(x,y) \in [0, \pi]$, 具有不确定性, 不能完全保证 $\theta(x,y) = \theta_i, i \in \{1, 2, 3, \dots, 2^{\frac{n+1}{2}}\}$ 。但是对于任何一个 $\theta(x,y)$ 而言, 总能找到一个 $\theta_i, i \in \{1, 2, 3, \dots, 2^{\frac{n+1}{2}}\}$, 使之最邻近 $\theta(x,y)$, 且当 n 越大时, 该 θ_i 越靠近 $\theta(x,y)$, 可见算法中模板的尺寸对滤波的效果有很大的影响。对于图像像素点 (x,y) , 采用下述自适应滤波的算法:

(1) 当 $E_x(x,y) = E_y(x,y) = 0$ 时, $D(x,y) = 0$ 。

(2) 当 $\theta(x,y) \in A_1$ 或 $\theta(x,y) \in A_{2^{\frac{n+1}{2}}+1}$ 时, 则调用能检测水平方向边缘的线型滤波器模板 \mathbf{H}_1 。计算 $D(x,y) = (I_1(x,y))_{n \times n} * \mathbf{H}_1$ 。

(3) 当 $\theta(x,y) \in A_2$ 时, 则调用能检测 θ_2 方向边缘的线型滤波器模板 \mathbf{H}_2 。计算 $D(x,y) = (I_1(x,y))_{n \times n} * \mathbf{H}_2$ 。

(4) 当 $\theta(x,y) \in A_i$ 时, 则调用能检测 θ_i 方向边缘的线型滤波器模板 \mathbf{H}_i 。计算 $D(x,y) = (I_1(x,y))_{n \times n} * \mathbf{H}_i$ 。

算法描述了像素点边缘方向角度的估计值 $\theta(x,y)$ 落在各角度区域中时, 所采取的滤波运算。其中, $(I_1(x,y))_{n \times n}$ 表示图像中以像素点坐标 (x,y) 为中心, $n \times n$ 大小的像素灰度级矩阵; $D(x,y)$ 表示坐标为 (x,y) 的像素点经过滤波后的最终灰度级。

5 实验结果

实验中采用不同的滤波方案对原图像图3(a)进行高通滤波, 由于文献[7]中的改进型 LOG 算子将人眼视觉对水平和垂直方向边缘较斜向边缘更为敏感这一机制引入算法中, 因此被认为是更接近人眼视觉的一种高通滤波模型。实验中采用 3×3 大小的模板算子。从图3中各图的整体效果看, 图3(e)中的滤波效果更优于图3(b)、(c)和(d)。实际上, 图3(b)、(c)与(d)和(e)分别表示图1(a)、(b)和(c)中3个阶段下感受野形变时产生的滤波效果。

将图3(b)~(e)中的标定区域进行放大, 分别用图4(a)~(d)表示。可以更清晰地比较采用图3中的几种滤波法的滤波效果。

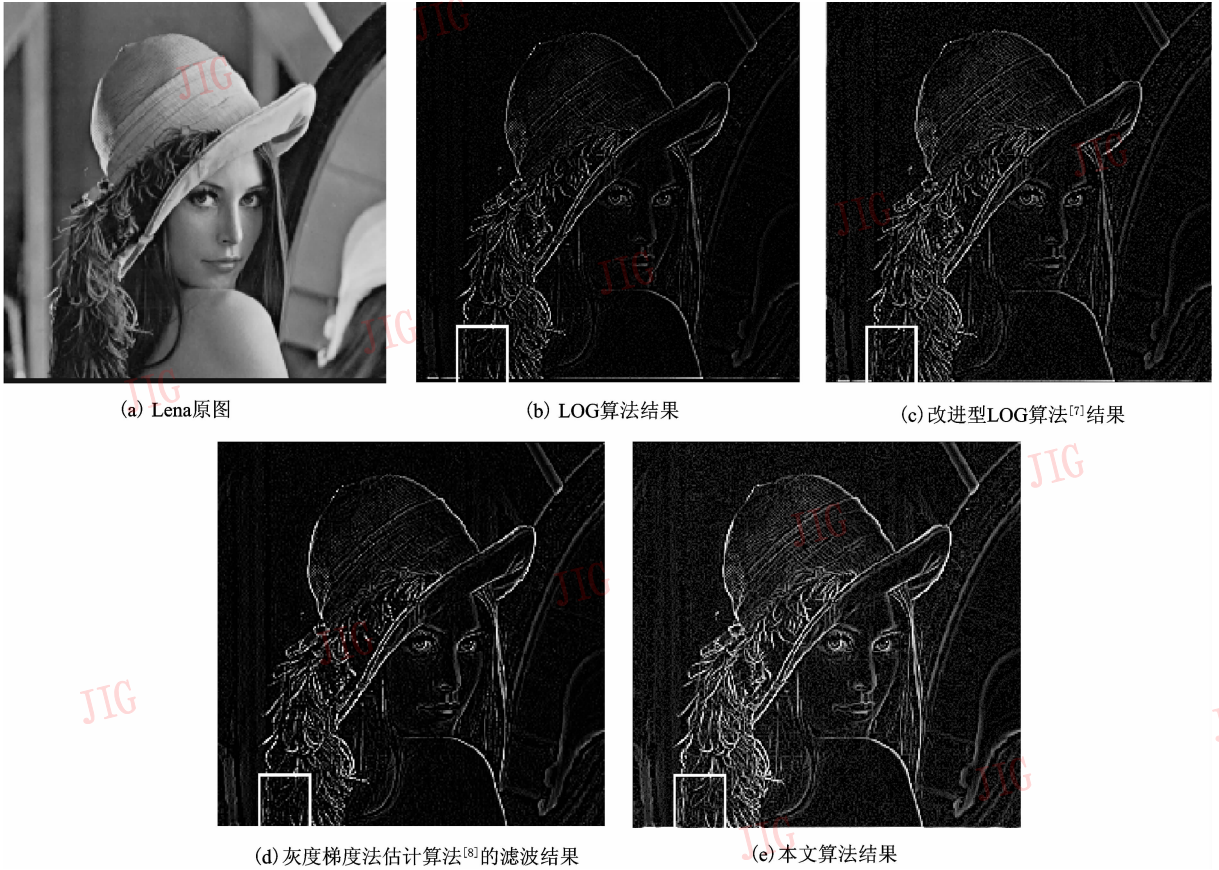


图 3 本文算法与其他算法的实验结果比较

Fig. 3 Experimental results comparison of the algorithm described in the paper with other methods

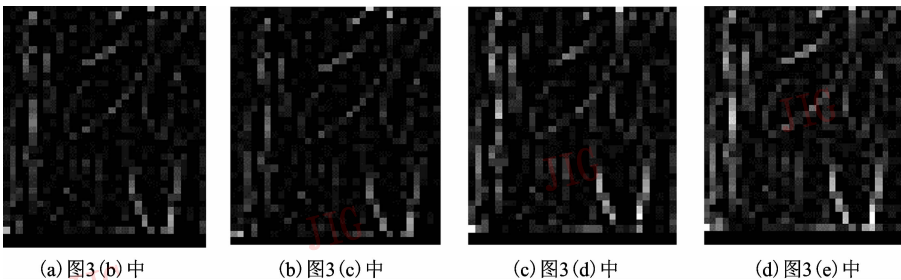


图 4 不同滤波方案下图 3 中标定区域放大效果图

Fig. 4 The labeled magnifying plot in Fig. 3 used different filtering scheme

表 1 比较了图 3 中的 4 种滤波方案进行滤波时的像素平均处理时间和滤波后的整个图像的灰度级总和。采用本文的滤波法得到的滤波后图像灰度级总和最大,表明滤波后能保持的高频信号越多。本文滤波算法在每个像素的平均处理时间为 5.6×10^{-5} s/p,实时性能略低于经典 LOG 滤波算法,但远远高于改进型的 LOG 滤波算法和灰度梯度边缘角估计的滤波算法。

表 1 不同滤波方案的性能比较

Tab. 1 The experimental data of the sampling used different filtering scheme

	经典 LOG 滤波法	文献[7]中改进型 LOG 算法	文献[8]中灰度梯度边缘角估计滤波法	本文的滤波法
像素平均处理时间 (s/p)	9×10^{-6}	5.6×10^{-4}	1.8×10^{-3}	5.6×10^{-5}
滤波后的图像灰度级总和	629 611	705 681	808 156	953 890

6 结 论

基于神经突触短时程可塑效应导致的感受野产生结构变形的视觉生理现象,提出了一种对人眼视觉注视机制的模拟算法,从理论分析中可以发现,经典的高斯滤波算子、文献[7]与文献[8]中高通滤波法和本文算法实际上分别对应着感受野形变的初始阶段、中间阶段和极限阶段(文献[7]中的算法实际上对应着感受野形变中间阶段的一种特殊形式)。而从实验效果上看,伴随着感受野形变的过程,高通滤波效果逐渐增强,所检测到的细节也越来越多。本文的算法直接采用感受野形变的极限阶段的自适应算法进行边缘检测,使得高通滤波效果和实时性都有了很大的提高。同时也验证了文中对在外界刺激下感受野形变方式提出的假设的合理性。解决了文献[7]中的遗留问题,更好地实现对人眼视觉的注视机制的模拟。结果表明,该算法尤其适合于快速高效的图像边缘检测和细节提取。

参考文献 (References)

- Richter J, Ullman S. A model for the temporal organization of X and Y-type receptive fields in the primate retina [J]. *Biological Cybernetics*, 1982, **43**(2): 127 ~ 145.
- David J F, Peter E H, Allan D J. Spatiotemporal inseparability in early visual processing [J]. *Biological Cybernetics*, 1985, **52**(3): 153 ~ 164.
- Li Chao-yi, Qiu Fang-tu. Simulation of spatial transfer properties of cat-retinal ganglion cell [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1995, **11**(3): 395 ~ 400. [李朝义, 邱芳土. 视网膜神经节细胞空间传输性的模拟 [J]. *生物物理学报*, 1995, **11**(3): 395 ~ 400.]
- Young R A. The Gaussian derivative model for spatial vision: I. Retinal mechanism [J]. *Spatial Vision*, 1987, **2**(4): 273 ~ 293.
- Martens J B. Deblurring digital images by means of polynomial transforms [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1990, **50**(2): 157 ~ 176.
- Campbell F, Kulikowski J J. Orientation selectivity of human visual system [J]. *Journal of Physical*, 1966, **187**(2): 437 ~ 441.
- Long Gong, Wang Yu-ping, Tan Zheng. A directional and scale-variable zero-crossing edge detector [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 1995, **10**(3): 175 ~ 180. [龙公, 王玉平, 谈正. 具有方向性、变尺度的过零交叉特征检测算子 [J]. *数据采集与处理*, 1995, **10**(3), 175 ~ 180.]
- Wang Huai-ye, Zhang Ke, Li Yan-jun. Anisotropic Gaussian filtering for infrared image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter. Waves*, 2005, **24**(2): 109 ~ 113. [王怀野, 张科, 李言俊. 各向异性滤波在红外图像处理中的应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(2): 109 ~ 113.]
- Zucker R S. Short-term synaptic plasticity [J]. *Annual Review of Neurosci*, 1989, **12**(1): 13 ~ 31.
- Larkman A U, Jack J J. Synaptic plasticity: hippocampal LTP [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1995, **5**(3): 324 ~ 334.
- Zucker R S. Calcium- and activity-dependent synaptic plasticity [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1999, **9**(3): 305 ~ 313.
- Li Qing-yu, Rong Pei-jing, Xu Wei-dong. Conditioning stimulation induced changed in receptive of spinal neurons. *Chin [J]. Chinese Journal of Neuroscience*, 1999, **15**(4): 316 ~ 319. [李青宇, 荣培晶, 徐卫东. 条件刺激引起脊髓神经元外周感受野的变化 [J]. *中华神经科学杂志*, 1999, **15**(4): 316 ~ 319.]
- Jia Yun-de. *Computer Vision [M]*. Beijing: Science Press, 2000. [贾云德. *机器视觉 [M]*. 北京: 科学出版社, 2000.]
- Wang Zhi, He Ssi-xian. An adaptive edge-detection method based on Canny algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*. 2004, **9**(8): 957 ~ 962. [王植, 贺赛先. 一种基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2004, **9**(8): 957 ~ 962.]