

文章编号: 1003-501X(2009)11-0106-06

改进的自适应阈值 Canny 边缘检测

雒 涛^{1,2}, 郑喜凤¹, 丁铁夫¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生部, 北京 100039)

摘要: 针对传统 Canny 边缘检测算法的阈值需要人为设定的缺陷, 本文提出了一种新的自适应改进方法。该方法根据梯度直方图信息, 提出梯度差分直方图的概念, 同时, 对图像进行自适应分类处理, 使得算法不仅不需要人工设定阈值参数, 而且还能有效地避免 Canny 算法在边缘寻找中的断边和虚假边缘现象。对边缘信息丰富程度不同的灰度图和彩色图像运用该方法寻找边缘的实验结果表明, 对于在目标与背景交界处的多数像素梯度幅值较大的图片, 该算法具有边缘检测能力强、自适应能力强的优点。

关键词: Canny 算法; 自适应; 边缘检测; 图像处理

中图分类号: TN247; TP391

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.11.022

Improved Self-adaptive Threshold Canny Edge Detection

LUO Tao^{1,2}, ZHENG Xi-feng¹, DING Tie-fu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The two thresholds of classical Canny operator need to be set manually, which limits the application of this algorithm. Therefore, many researches about how to choose threshold adaptively are done to solve this problem. Based on the gradient histogram, a method of threshold-adaptable edge detection is proposed. This method is on the basis of gradient histogram difference diagram with adaptive image classification techniques. It not only automatically sets the two thresholds, but also avoids disconnected or false edges in detection. Experiments prove that the method is threshold-adaptive and advantageous for edge detection in color image whose pixels of larger gradient amplitude are mainly located in the edge between the target and background.

Key words: Canny operator; threshold-adaptive; edge detection; image process

0 引 言

边缘是重要的图像特征。因此, 边缘检测是图像处理与分析的基础性课题, 受到人们广泛而深入的研究。传统边缘的检测算子, 如 Robert、Prewitt、Kirsch、Sobel、LoG、Canny 等, 本身存在种种不足, 在许多情况下无法达到很好的检测效果。近年来, 在传统方法的基础上, 相继发展出了一批新的边缘检测方法, 如曲面拟合法、基于自适应平滑滤波法、小波变换法等。尽管如此, Canny 算子由于具有较好的信噪比和检测精度, 仍然在图像处理领域得到广泛应用。

利用 Canny 算子进行边缘检测时, 需要人为确定高、低阈值的参数, 而且不同的阈值对边缘检测的结果影响很大。但是, 在实际情况中, 不同图像取得最佳边缘检测效果的阈值各不相同。如果简单地使用传

收稿日期: 2009-05-12; 收到修改稿日期: 2009-07-14

基金项目: 中国科学院东北振兴科技行动计划重点项目(DBZX-2-017); 吉林省信息产业发展专项资金项目

作者简介: 雒涛(1982-), 男(汉族), 山东济南人。博士研究生, 主要研究图像处理与视频压缩。E-mail: luotaomao@163.com。

统 Canny 算子,一方面很难每次检测前都人为地设定阈值参数,另一方面若对每幅图像采用相同阈值,则会检测出虚假边缘或丢失局部边缘^[1]。因此,有必要对传统 canny 算法进行改进,使其可以自适应的设定高、低阈值,从而可以对各种图像获得较好的边缘检测效果。

本文根据边缘信息的复杂程度,将图像分为三类。结合图像梯度直方差分图,自适应地获取高、低阈值。对多幅灰度图、RGB24 位彩色图进行边缘检测实验的结果表明,本方法可以取得很好的边缘检测效果。

1 Canny 算法简介

Canny 认为一个优良的边缘检测算子应具有以下 3 个特性:

- 1) 好的检测性能。不会漏检真实边缘,也不把非边缘点作为边缘点检出,使输出的信噪比最大;
- 2) 好的定位性。检测到的边缘点与实际边缘点位置最近;
- 3) 唯一性。对于单个边缘点仅有一个响应。

根据以上 3 个准则, Canny 推导出最优边缘检测算子的一个近似实现^[2],即边界点位于图像被高斯函数平滑后的梯度幅度极大值点上。实现过程如下:

用二维高斯滤波 $G(x, y)$ 平滑图像,减少噪声影响。它可以等效为用水平方向 $G(x)$ 和竖直方向 $G(y)$ 的两个一维高斯滤波器,分别进行滤波处理。平滑后的图像为

$$H(x, y) = G(x, y) * I(x, y) = G(y) * (G(x) * I(x, y)) \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 代表原图像, $H(x, y)$ 代表滤波后的图像。

用一阶偏导的有限差分计算并保存水平方向的方向导数 $G(x)$ 和竖直方向的方向导数 $G(y)$, 可以采用 Sobel 或 Prewitt 算子。然后,利用方向导数计算梯度幅值 ∇f 。

$$\nabla f = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

为了精确地确定边缘点位置,对各像素点的梯度值进行非极大值抑制(NMS)。即在当前像素点的 3×3 邻域内,如果当前点的梯度幅值大于沿梯度方向上相邻两个像素点的梯度幅值,则认为该点是可能的边缘点,将其对应的标志位置 1。否则,则认为该点为非边缘点,将其对应的标志位清 0。

对经过非极大值抑制处理后的图像进行双阈值化处理,消除虚假边缘并连接断续边缘。即通过给定的高阈值系数和图像的直方图,计算高阈值,然后,通过给定的低阈值系数,计算低阈值。再用高阈值与经过非极大值抑制后的图像进行比较,记录边缘点。对所有的边缘点,在 8 邻域内迭代寻找大于低阈值的点,并标记为边缘点。

通过上面的过程,可以得到单边缘宽度的边缘图像。可以看出,传统的 Canny 算法在实际应用中存在如下问题:

传统 Canny 算法的噪声平滑能力与边缘定位能力相矛盾。当高斯空间 δ 取值较小时,边缘定位精度高,但图像平滑作用较弱,抑制噪声能力差,因而在有噪声的情况下不稳定;要获得好的噪声抑制效果,必须增大 δ 的取值,但又导致模板增大,使边缘位置偏移严重,且运算量增加^[3]。

传统 Canny 算子在阈值化处理时的阈值需要预先设定。设定的方法是先确定高阈值系数,该系数定义为梯度幅值小于阈值的像素点所占像素总数的比例,通过高阈值系数可求出高阈值,并且认为低阈值为高阈值的一半。而实际的图像因受光照、场景等变化因素的影响,高、低阈值系数不可能是一个确定不变的值,所以传统的方法不具有自适应能力,在许多情况下也难以得到好的检测结果^[4]。

2 改进的自适应阈值的 Canny 算法

针对传统 Canny 算法的不足,人们提出了各自的解决方法。

D.J.Park 等人在 Canny 算子的基础上,提出了多分辨率边缘检测的办法,同时提取同一图像上的缓变边缘和精细边缘^[5-6]。

还有人用固定小 $\delta(\delta=1)$ 的滤波器,通过 Wiener 滤波及选择合适的高、低门限来提高信噪比^[7]。

也有人将小波分析^[8]、模糊增强^[3]、梯度直方图^[4]等概念引入 Canny 算法,也达到了一定的效果。

受梯度直方图方法的启发,本文采用梯度直方图差分表的方法,确定高、低阈值。并根据边缘复杂度,对图像进行自适应的分类处理,取得了较好的效果。

2.1 梯度直方差分析方法

图像 $I(x, y)$ 经过非极大值抑制后,对所有边缘标志不为 0 的像素可以用梯度直方图的形式进行描述。

图 1 为 256×256 分辨率 8 位灰度的 Lenna 图片的梯度直方图。其中横坐标为梯度值,纵坐标为各梯度值对应的像素点的个数。

分析梯度直方图,可以得出以下规律:

1) 梯度不为 0 的像素,大多集中在梯度值较小的区域内。这对应于原图像中所占比例较大的背景区域,以及具有平缓变化的区域。

2) 曲线总体呈迅速下降趋势,直至在某一梯度值之后,对应的像素点个数全部为 0。这说明,图像中灰度剧烈变化的像素数量是减少的。可以根据这个特性,按照直方图中的比例关系,找到高阈值,从而确定基本的边缘像素。

3) 曲线局部具有上下震荡的特性。每个极大值代表一类边缘强度像素点的集合。选取适当的峰值处作为高阈值,可以有效的区分背景和边缘信息。

为了便于寻找直方图中的局部极大值、极小值点,根据下面的公式计算差分。

$$diff(i) = dif(i) - dif(i-1) \quad (3)$$

式中: $diff(i)$ 为梯度差分直方图中,梯度值为 i 处的像素个数差分值,表示直方图中 i 比 $i-1$ 梯度幅值处多出的像素数量; $dif(i)$ 、 $dif(i-1)$ 分别为梯度幅值为 i 和 $i-1$ 处的像素数量。计算结果绘于图 2。

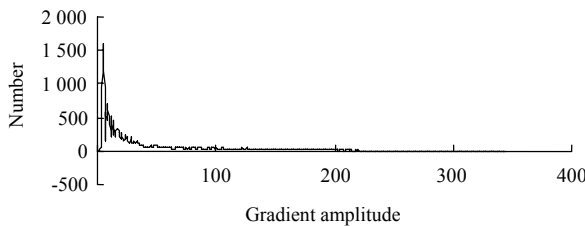


图 1 Lenna 灰度图的梯度直分图

Fig.1 Gradient histogram of gray image

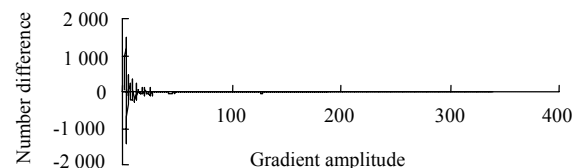


图 2 Lenna 灰度图的梯度差分直分图

Fig.2 Gradient difference histogram of gray image

分析梯度差分直方图,可以得出以下规律:

1) 差分像素个数为正负震荡,且振幅迅速降低。

2) 过零点为直方图的局部极值点。过零点为由正到负过渡,对应直方图中的局部极大值点;过零点为由负到正过渡,则对应直方图中的局部极小值点。

阈值的选择问题,实际上就是在梯度差分直方图中找出合适的过零点位置。通过多次实验,当图像边缘信息较少时,选取高阈值与低阈值的公式为式(4)、(5)、(6)效果最理想。

$$formula = ([diff(i-1) + diff(i)] > 0 \parallel [diff(i) + diff(i+1)] > 0) \quad (4)$$

$$TH_l = \min(\{i : i \in (2, TH_{max}) \& \& formula\}) \quad (5)$$

$$TH_h = TH_l / 2 \quad (6)$$

式中: TH_h 、 TH_l 为要确定的高阈值与低阈值; TH_{max} 为梯度差分直方图中,差分数量不为 0 的最大梯度值; $diff(i)$ 为 i 梯度值处的差分像素个数。

这种方法在边缘信息较少的图像中,效果较好。在边缘信息丰富的图像中,会获取过多的边缘细节。因此,可以采用图像分类处理方法,与它配合使用,达到比较理想的适应性。

2.2 图像分类处理方法

在计算梯度直方图时,得到的梯度不为 0 的所有像素的总和,本文统称为边缘信息。边缘信息包含缓变区域以及突变区域。当边缘信息很多时,如果仍然采用上文提到的方法进行边缘检测,则很有可能会造

成边缘的误检测。这是由于算法将背景中的渐变区域, 误判为图像边缘。如图 3 所示。背景中的渐变区域被误认为是图像边缘, 从而干扰了对目标的边缘提取和识别, 因此并不是理想的检测结果。

为了克服这种不足, 采用图像分类处理方法。本文所提出的边缘自适应检测算法, 是基于目标的视频非线性缩放课题的预处理部分。根据课题要求, 当图像边缘信息不多时, 期望检出所有边缘; 当边缘信息过于丰富时, 期望限制检测到的边缘总数, 方便后面的目标识别处理。因此, 本文通过边缘信息的数量, 将图像分为边缘信息较少、边缘信息丰富以及边缘信息过多三种情况, 分别采用不同的自适应算法, 以达到比较理想的边缘检测效果。

当边缘点数量与图像边缘比例小于 0.23 时, 图像边缘信息较少。可以直接采用式(4)、(5)、(6)计算。

当边缘点数量与图像边缘比例大于 0.23 且小于 0.32 时, 图像边缘信息丰富。可以用式(4)、(7)、(8)计算阈值。

$$TH_h = \max(\{i : i \in (3, TH_{\max}) \text{ \& formula \& } dif_{th} > dif_{4C}\}) \quad (7)$$

$$TH_l = \max(\{i : i \in (3, TH_{\max}) \text{ \& formula \& } dif_{th} > dif_{16C}\}) \quad (8)$$

式中: dif_{th} 为梯度幅值大于 TH_h 或 TH_l 的像素数量; dif_{4C} , dif_{16C} 分别是 4 倍和 16 倍图像周长的像素数量。

当边缘点数量与图像边缘比例大于 0.32 时, 图像边缘信息过多。可以用式(4)、(9)、(10)计算阈值。

$$TH_h = \max(\{i : i \in (3, TH_{\max}) \text{ \& formula \& } dif_{th} > dif_{2C}\}) \quad (9)$$

$$TH_l = \max(\{i : i \in (3, TH_{\max}) \text{ \& formula \& } dif_{th} > dif_{20C}\}) \quad (10)$$

这里需要说明的是, 在式(7)~(10)中, 用于划分图像类型以及与 dif_{th} 进行比较的数值, 都是通过对美国德州大学奥斯丁分校图库中的百余幅图像^[10]的多次实验得到。在进一步的研究中, 可以采用更加合理的方法对其进行优化。

3 实验结果与结论

对边缘信息丰富程度不同的灰度图像和彩色图像, 分别用传统的 Canny 算法和改进的自适应阈值 Canny 算法进行边缘检测。

3.1 灰度图边缘检测效果

Lenna 灰度图像具有丰富的边缘信息, 对它进行边缘检测的结果如图 4 所示。图 4(a)是原始灰度图, 分辨率为 256×256 ; 图 4(b)和图 4(c)是采用经典 Canny 算法的边缘检测结果, 对应的高阈值系数分别为 0.8 和 0.7; 图 4(d)是采用本文自适应 Canny 算法的边缘检测结果。

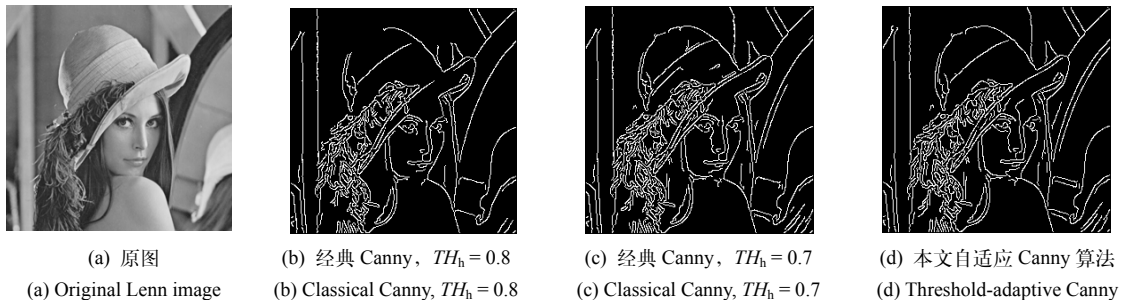


图 4 Lenna 灰度图像的边缘检测效果图

Fig.4 Lenna image and its edge detection result

可以看出, 图 4(b)中, 在 Lenna 的帽檐处出现明显的断边。图 4(c)在镜子上方处有断边, 而且在帽子

内部检测出一些多余的边缘。相比之下,图 4(d)的边缘完整,与经典算法相比,可以检出更少的虚假边缘。

2009 年上海车展灰度图像具有极为丰富的边缘信息,对它进行边缘检测的结果如图 5 所示。图 5(a)是原始灰度图,分辨率为 800×600 ; 图 5(b)和图 5(c)是采用经典 Canny 算法的边缘检测结果,对应的高阈值系数分别为 0.75 和 0.8; 图 5(d)是采用本文自适应 Canny 算法的边缘检测结果。

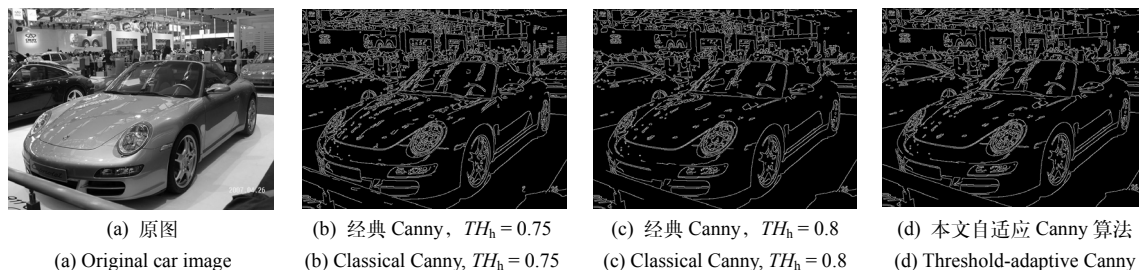


图 5 2009 年上海车展灰度图像的边缘检测效果图

Fig.5 2009' Shanghai auto expo image and its edge detection result

可以看出,图 5(b)~图 5(d)并没有明显的差别。本文的自适应 Canny 算法与选择合适高低阈值的经典 Canny 算法检测效果相似。

3.2 彩色图边缘检测效果

研究表明在彩色图像中有 10% 的边缘在灰度图像中检测不到^[9]。因此,对于彩色边缘,有三种方法进行检测:

- 1) 在彩色空间上建立一种可度量的距离,利用这个距离的不连续性来检测彩色边缘;
- 2) 在彩色图像的三个分量上独立地计算边缘,然后,将结果用某种方法组合;
- 3) 允许在各分量上计算边缘时有较大的独立性,但对各分量加上一致性限制条件,以便同时利用三个分量上的边缘信息。

本节采用的是第二种方法。在原始彩色图像的 R、G、B 三分量上独立检测边缘。然后,将三个检测结果叠加,得到的二值化图像就是彩色边缘图。

C. Ronaldo 彩色图像虽然背景复杂,但目标具有较少的边缘信息,对它进行边缘检测的结果如图 6 所示。图 6(a)是原始彩色图,分辨率为 799×617 ; 图 6(b)和图 6(c)是采用经典 Canny 算法的边缘检测结果,对应的高阈值系数分别为 0.9 和 0.95; 图 6(d)是采用本文自适应 Canny 算法的边缘检测结果。

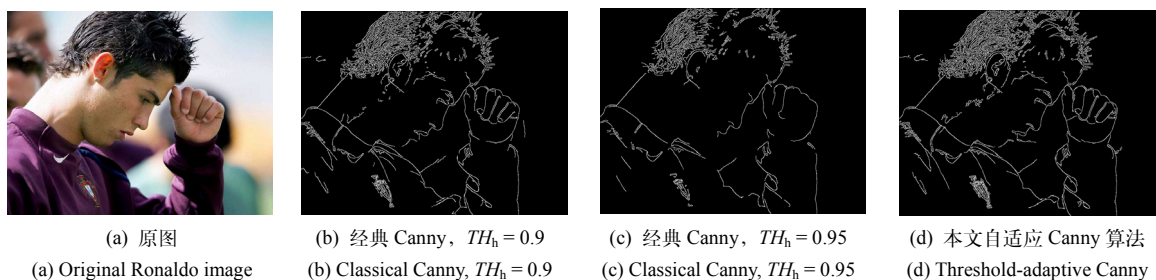


图 6 C.Ronaldo 彩色图像的边缘检测效果图

Fig.6 Color image of C.Ronaldo and its edge detection result

可以看出,图 6(b)中,目标人物轮廓清晰,但背景的轮廓(颈后、手指附近)对边缘检测结果仍有一定影响,存在虚假边缘问题。图 6(c)在目标人物的面部、下巴、手指等多处出现明显的断边现象。图 6(d)虽然目标人物的颈后仍然存在虚假边缘,但 C.Ronaldo 的轮廓清晰,没有断边现象。是给出的三个边缘图像中效果最好的。

摄影师彩色图像具有丰富的边缘信息,对它进行边缘检测的结果如图 7 所示。图 7(a)是原始彩色图像,分辨率为 510×512 ; 图 7(b)和图 7(c)是采用经典 Canny 算法的边缘检测结果,对应的高阈值系数分别为 0.9

和 0.95; 图 7(d)是采用本文自适应 Canny 算法的边缘检测结果。

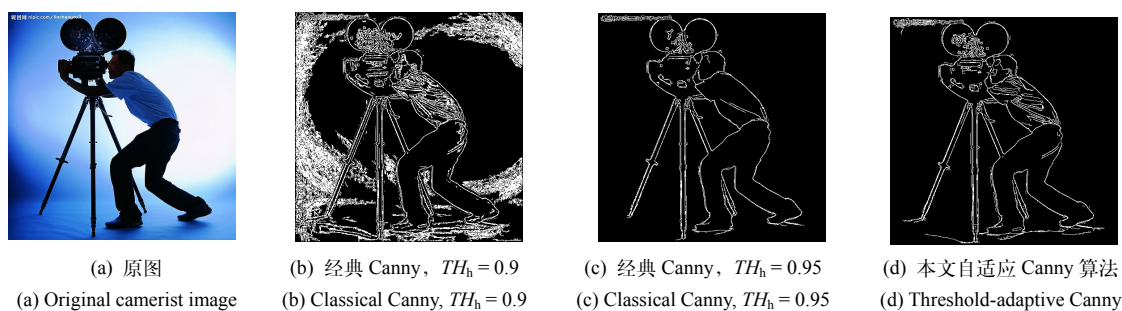


图 7 摄影师彩色图像的边缘检测效果图

Fig.7 Color image of camerist and its edge detection result

可以看出, 图 7(b)中, 原图的背景光晕严重影响了边缘检测结果, 出现了大量的虚假边缘。图 7(c)边缘检测结果最优, 完全消除了背景的影响, 仅仅在摄影师的双脚脚底出现明显的断边现象。图 7(d)基本没有受到背景的干扰, 在摄影师后脚脚底仍然存在断边现象, 总体效果介于前两者之间。

滑雪竞赛彩色图像具有极为丰富的边缘信息, 对它进行边缘检测的结果如图 8 所示。图 8(a)是原始彩色图像, 分辨率为 1280×720 ; 图 8(b)和图 8(c)是采用经典 Canny 算法的边缘检测结果, 对应的高阈值系数分别为 0.75 和 0.85; 图 8(d)是采用本文自适应 Canny 算法的边缘检测结果。

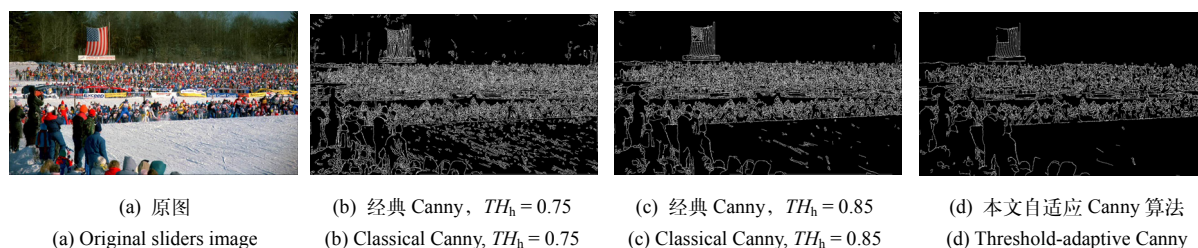


图 8 滑雪竞赛彩色图像的边缘检测效果图

Fig.8 Color image of sliders and its edge detection result

可以看出, 图 8(b)中, 原图的背景(如雪地、树林等)并未完全消除, 严重制约了边缘检测质量。图 8(c)基本消除了背景的影响, 观众轮廓比较清晰。图 8(d)几乎没有受到背景的干扰, 但下方观众的头像出现明显的断边, 总体效果介于前两者之间。

本算法对那些梯度幅值较大的像素点主要分布在目标与背景的边界处的图片, 具有良好的边缘检测能力。不仅可以排除缓慢变化的背景的影响, 还能自适应地设置低阈值, 连接断续边缘, 将目标完整地包含在闭环区域内。

参考文献:

- [1] 韦海萍, 赵保军, 唐林波, 等. Canny 算法的改进及其硬件的实现 [J]. 光学技术, 2006, 32(2): 62-65.
WEI Hai-ping, ZHAO Bao-jun, TANG Lin-bo, *et al.* Improvement of Canny algorithm and implementation in hardware [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 62-65.
- [2] John Canny. A Computational Approach to Edge Detection [J]. *IEEE Trans. on PAML*(S0162-8828), 1988, 18(6): 679-698.
- [3] 王文娟, 韩峰, 崔桐. 一种基于模糊增强的 Canny 边缘检测方法 [J]. 内蒙古工业大学学报, 2008, 27(1): 65-69.
WANG Wen-juan, HAN Feng, CUI Tong. A New Canny edge detection method devised on the basis of fuzzy enhancement [J]. *Journal of inner Mongolia university of technology*, 2008, 27(1): 65-69.
- [4] 何文浩, 原魁, 邹伟. 自适应阈值的边缘检测算法及其硬件实现 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 233-237.
HE Wen-hao, YUAN Kui, ZOU Wei. Self-adaptive threshold detection and its implementation in hardware [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(1): 233-237.

(下转第 117 页)

- (S0001-0782), 1984, **27**(8): 807-818.
- [2] Hwan G H, Haddad R A. Adaptive median filters: new algorithms and results [J]. **IEEE Trans. on Image Processing**(S 1057-7149), 1995, **4**(4): 499-502.
- [3] Saramaki T. A class of window functions with nearly minimum sidelobe energy for designing FIR filters[C]//**IEEE International Symposium on Circuits and Systems**, Portland, OR, USA, May 8-11, 1989, **1**: 359-362.
- [4] 苏飞, 王兆华. DCT 域全相位 FIR 滤波器设计和实现 [J]. 天津大学学报, 2004, **37**(12): 1110-1114.
SU Fei, WANG Zhao-hua. Implementation and Design of All Phase FIR Filter in DCT Domain [J]. **Journal of Tianjin University**, 2004, **37**(12): 1110-1114.
- [5] 苏飞, 王兆华. 基于带双窗 N-1/N 重叠频域 FIR 的自适应除噪 [J]. 电子测量和仪器学报, 2005, **19**(1): 7-13.
SU Fei, WANG Zhao-hua. ANC Based on N-1/N Overlapping FIR Filter with Dual Windows in Frequency Domain [J]. **Journal of Electronic Measurement and Instrument**, 2005, **19**(1): 7-13.
- [6] 苏飞, 王兆华. 一种新的带窗重叠自适应滤波器 [J]. 电子与信息学报, 2005, **27**(1): 27-30.
SU Fei, WANG Zhao-hua. A Novel Overlapping Adaptive Filter with Window [J]. **Journal of Electronics & Information Technology**, 2005, **27**(1): 27-30.
- [7] 王红梅, 李言俊, 张科. 基于平稳小波变换的图像去噪方法 [J]. 红外技术, 2006, **28**(7): 404-407.
WANG Hong-mei, LI Yan-jun, ZHANG Ke. An Image Denoising Method Based on Stationary Wavelet [J]. **Infrared Technology**, 2006, **28**(7): 404-407.
- [8] 李士心, 刘鲁源, 杨晔, 等. 基于平稳小波变换的陀螺仪信号去噪方法 [J]. 天津大学学报, 2003, **36**(2): 165-168.
LI Shi-xin, LIU Lu-yuan, YANG Ye, *et al.* Gyro Signal Denoising Using Stationary Wavelet Transform [J]. **Journal of Tianjin University**, 2003, **36**(2): 165-168.
- [9] 管聪慧, 赵志刚, 何琦. 基于邻域相关性的小波图像自适应软阈值降噪 [J]. 青岛大学学报: 自然科学版, 2006, **19**(2): 58-65.
GUAN Cong-hui, ZHAO Zhi-gang, HE Qi. Wavelet Image Adaptive Soft-thresholding De-noising Based on Neighbor Dependency [J]. **Journal of Qingdao University: Natural Science Edition**, 2006, **19**(2): 58-65.
- [10] 林晓梅, 李琳娜, 牛刚, 等. 基于小波边缘检测的图像去噪方法 [J]. 光学 精密工程, 2004, **12**(1): 88-93.
LIN Xiao-mei, LI Lin-na, NIU Gang, *et al.* Image de-noising based on wavelet edge detection [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2004, **12**(1): 88-93.

~~~~~  
(上接第 111 页)

- [5] Park D J, Park R H. Hierarchical edge detection using the bidirectional information in edge pyramids [J]. **Pattern Recognition Letters**(S0167-8655), 1994, **15**: 65-75.
- [6] Park D J, Nam K M, Park R H. Multiresolution edge detection techniques [J]. **Pattern Recognition**(S0031-3203), 1995, **28**(2): 211-219.
- [7] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究 [J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(3): 509-514.  
LIN Yu-chi, CUI Yan-ping, HUANG Yin-guo. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2006, **14**(3): 509-514.
- [8] 唐正军, 刘代志. 改进多尺度 Canny 算子在 SAR 图像边缘提取中的应用 [J]. 上海航天, 2000, **17**(2): 7-10.  
TANG Zheng-jun, LIU Dai-zhi. SAR image edge detection [J]. **Aerospace Shanghai**, 2000, **17**(2): 7-10.
- [9] KOSCHAN A. A Comparative Study on Color Edge Detection[C]// **Proceedings 2<sup>nd</sup> Asian Conference on Computer Vision ACCV'95**, Singapore, Dec 5-8, 1995, **III**: 574-578.
- [10] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, *et al.* LIVE Image Quality Assessment Database Release 2[EB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, 2006.