

基于边缘检测与双边滤波的彩色图像去噪

张 闯,迟健男,张朝晖,王志良

(北京科技大学信息工程学院,北京 100083)

摘 要: 针对彩色图像双边滤波去噪方法存在的不足,本文提出一种边缘检测与双边滤波相结合的彩色图像去噪方法.首先利用细胞神经网络(CNN)模型导出一种新的彩色图像分块自适应边缘检测算法,继承了CNN灰度边缘检测算法定位准确的优点,又弥补了CNN现有算法不能直接处理彩色图像的空白.接下来提出一种针对图像增强的边缘滤波算法,通过两级边缘检测满足去噪不同阶段对边缘检测的不同要求.在此基础上,用改进的双边滤波器对彩色图像进行去噪,通过非抗噪边缘图对噪声范围进行定位,以缩小双边滤波的范围,减少去噪过程带来的图像模糊,并且对双边滤波加权平均方式进行改进,减小噪声点本身的权重,降低高频噪声的影响.最后根据滤波后的去噪边缘图对彩色图像进行增强.实验结果表明,文中方法在有效去除噪声的同时保护和增强了图像中的边缘.

关键词: 边缘检测; 双边滤波; 彩色图像; 边缘滤波; 去噪; 细胞神经网络(CNN)

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1776-08

Removing Noise of Color Images Based on Edge Detection and Bilateral Filter

ZHANG Chuang, CHI Jian-nan, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-liang

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: For the disadvantages of color bilateral noise filtering, this paper presents an integrated approach to address these issues based on edge detection and bilateral filter. First, a new color edge detection algorithm of adaptive partition is derived from cellular neural network (CNN) model. This algorithm inherits the advantage of accurate positioning of CNN gray edge detection, and can deal directly with color images. Next, an edge filter is proposed for image enhancement, which satisfies different stages of denoising through two types of edge detection. On this basis, removing noise of color images uses of the improved bilateral filter. The scope of noise is localized by non-anti-noise edge map to reduce the denoising process and image blur. Average mode of bilateral filter is improved to reduce the weight of noise and the impact of high-frequency noise. Finally, color images are enhanced according to the edge map after filtering. The experimental results show that the proposed approach can effectively reduce the noise while preserving and enhancing edges.

Key words: edge detection; bilateral filtering; color image; edge filter; denoising; cellular neural network (CNN)

1 引言

彩色图像去噪在数学上可归纳为两种模型,一种是分别在彩色图像各个通道上进行去噪,称为逐通道模型,例如,小波彩色图像去噪方法;另一种是将各个通道的数据作为一个向量整体进行去噪,称为向量模型,例如,向量中值滤波^[1],向量方向滤波^[2],数据自适应滤波^[3],双边滤波等.第一种模型割裂了彩色图像各个通道的联系,势必会对图像本身信息结构造成影响.最常见的问题就是去噪过程独立改变各个通道的像素值会造成去噪后图像产生伪色彩.双边滤波作为一种可以整体处理彩色图像的滤波器,首先由 C Tomasi^[4]提出,之后

又产生了一些变型,比如:sigma 滤波,邻域滤波,SUSAN 滤波.彩色图像双边滤波去噪的特点是既可以达到滤波的效果又可以保护图像的高频细节.但其仍然存在以下问题:(1)双边滤波过程仍然是像素在空间上加权平均的过程,去噪图像在信噪比增强的同时,边缘仍然不可避免地产生一定的模糊;(2)双边滤波由于保护高频信息,对于图像里的高频噪声,不容易干净的滤掉^[5].

针对彩色图像双边滤波去噪方法的上述不足,本文提出一种基于边缘检测与双边滤波相结合的彩色图像去噪方法,主要解决以下几个问题:(1)边缘定位的准确性,很多边缘检测算法对边缘的定位不准确,无法通过得到的边缘图确定边缘及噪声的准确位置;(2)边缘

图中包含噪声引起的伪边缘,而图像增强仅需要增强人眼敏感的边缘区域,对其它区域做增强会造成图像失真,所以边缘图需要通过边缘滤波去除噪声引起的伪边缘后才能用于图像增强;(3)由传感器或电路引起的噪声产生于 RGB 彩色空间,直接在 RGB 彩色空间进行边缘检测,可以避免彩色空间转换带来的噪声放大和噪声类型复杂化^[6].但是在 RGB 彩色空间进行图像去噪会产生伪彩色;(4)如果图像增强在彩色图像三个通道上分别独立进行,在边缘附近将产生颜色的混乱.

为了解决以上问题,本文提出基于边缘检测和双边滤波的彩色图像去噪方法,本文去噪流程包括边缘检测,边缘滤波,改进的双边滤波和彩色图像增强,主要工作如下:(1)为了更好地对彩色边缘准确定位,提出一种适合彩色图像去噪的彩色图像边缘检测算法.继承了 CNN 灰度边缘检测算法定位准确的优点,填补了 CNN 现有算法不能直接处理彩色图像的空白;(2)提出一种针对图像增强的边缘滤波算法.通过两级边缘检测满足去噪不同阶段对边缘检测的不同要求;(3)通过改进双边滤波,减少去噪过程带来的边缘模糊;(4)使用不同的彩色空间,在 RGB 彩色空间进行边缘检测以定位边缘及噪声,在 CIELAB 彩色空间去噪以保持颜色的一致性,仅对亮度分量(L^*)进行增强以避免颜色的混乱与失真.方法的整个流程如图 1 所示.

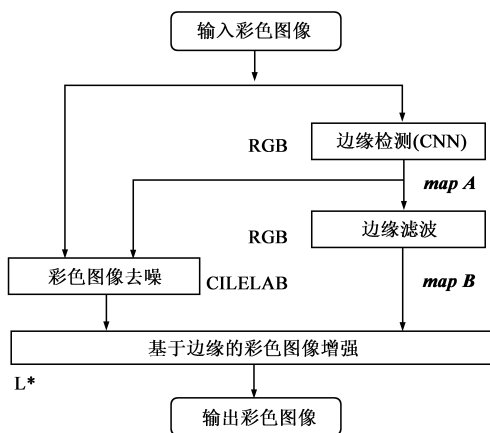


图1 彩色图像去噪流程图

边缘检测结果记为 $map A$, $map A$ 包含图像中的各种边缘也包含由噪声引起的伪边缘, $map A$ 用于图像去噪. $map A$ 经过边缘滤波后得到 $map B$, 边缘滤波的目的是去除由噪声引起的伪边缘,使 $map B$ 可以用来增强图像而不会带来彩色图像失真.

在得到边缘图 $map A$ 后,通过边缘信息对双边滤波作出改进,在提高去噪效果的同时减少了滤波对图像清晰度的影响.为了不在双边滤波过程中带来颜色混乱和图像失真,双边滤波在 CIELAB 彩色空间内进行.最后对彩色图像做基于 $map B$ 边缘的增强,增强在

CIELAB 彩色空间内进行,仅增强边缘区域对应位置的亮度分量.

2 基于 CNN 的彩色图像分块自适应边缘检测

现有的彩色图像边缘检测方法^[7],有相当部分是灰度图像边缘检测的推广,也即首先基于某一彩色分量的图像进行灰度图像边缘检测,然后再将每一独立分量的边缘图联合形成彩色图像的边缘.这些方法忽略了人眼对颜色的视觉感知,没有考虑各颜色分量之间的联系,往往得不到好的边缘检测效果.而基于彩色空间的边缘检测方法可以充分利用彩色图像中携带的彩色信息^[8~9].为了充分考虑人眼对不同颜色感知程度的不同,同时克服彩色空间角向量距离^[10]计算复杂的缺点,本文使用彩色空间欧几里得距离^[11]作为彩色象素之间差异的度量.

很多的边缘检测算法都工作在 YcbCr 彩色空间的 Y 分量上或者 CIELAB 彩色空间的 L^* 分量上.但是在本文提出的方法中边缘检测算法工作在 RGB 彩色空间.虽然彩色图像的理论指出人眼对亮度分量的变化比色度分量更敏感,但是由传感器或电路引起的噪声产生于 RGB 彩色空间,直接在 RGB 彩色空间进行边缘检测,可以避免彩色空间转换带来的噪声放大和噪声类型复杂化.使用 RGB 彩色空间进行边缘检测的另一个原因是,图像中存在着一些位于颜色不同但亮度相似的区域之间的边缘,仅用亮度分量无法检测到这些边缘.

使用哪种边缘检测方法必须根据问题的需要进行选择,彩色图像去噪方法对边缘结果主要有以下几点要求:(1)能够检测到图像中的细小边缘;(2)边缘定位准确,无像素偏移;(3)对噪声无抑制作用;(4)要求边缘非二值,为下一步的边缘滤波提供条件;(5)可以在彩色空间内对各分量整体处理,充分利用图像中携带的彩色信息;(6)能够根据图像中各个区域的性质自适应地选择合适的参数进行边缘检测;(7)不要求单像素边缘,不要求连续封闭边缘;(8)考虑应用于实时系统,边缘检测方法应可并行计算和便于硬件实现.

为了满足上述要求,本文提出一种基于细胞神经网络(CNN)的彩色图像边缘检测算法.CNN 方法最突出的优点是能高速并行计算,且处理速度与图像大小无关,并便于硬件实现,这使得其在图像实时处理方面具有广泛的应用前景.本文对 CNN 模板进行理论分析和鲁棒性研究,提出一个实现彩色图像边缘检测功能要求的 CNN 鲁棒性定理,为设计相应的 CNN 模板参数提供了解析判据.继承了 CNN 的优点,填补了 CNN 现有算法不能直接处理彩色图像的空白.实验结果表明,该算法可以对不同特性的彩色图像进行有效的边缘提

取. 以下详细介绍算法流程.

2.1 CNN 的鲁棒性设计

(1) CNN 模板设计

定义 CNN 模板^[12~13]如下:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{-1,-1} & b_{-1,0} & b_{-1,1} \\ b_{0,-1} & 0 & b_{0,1} \\ b_{1,-1} & b_{1,0} & b_{1,1} \end{pmatrix} \quad \mathbf{Z} = z$$

这里 $a > 1$, $b_{k,l}$ 为非线性函数 $b_{k,l}(\Delta u)$, 根据 CNN 的数学描述和彩色空间欧几里得距离, 可得:

$$\Delta u = [(u_{i,j} - u_{i+k,j+l})^T (u_{i,j} - u_{i+k,j+l})]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{ij} - u_{i+k,j+l} = [(u_{i,jR} - u_{i+k,j+lR}), (u_{i,jG} - u_{i+k,j+lG}), (u_{i,jB} - u_{i+k,j+lB})]^T$$

$$b_{k,l} = \begin{cases} c, & \text{if } |\Delta u| > g \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

(2) CNN 全局功能

① 给定初始状态为 $\mathbf{X}(0) = (x_{i,j}(0))_{M \times N}$, 取 $x_{i,j}(0) = 0$; ② 选择边界条件为循环边界条件; ③ 最终输出的边缘图像为 $\mathbf{Y}, \mathbf{Y} \Rightarrow \mathbf{Y}(\infty) = (y_{i,j}(\infty))_{M \times N}$; ④ 用 CNN 检测彩色图像边缘就是将输入的彩色图像 \mathbf{U} 映射成输出的边缘图像 \mathbf{Y} , 即 $F: \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{Y}$, 通过分析图像中边缘点的特点建立适当的局部规则, 进而构造 CNN 模板参数的取值.

(3) CNN 局部规则

局部规则 1: 当 $u_{i,j}$ 相邻八个像素点中至少有三个像素满足 $|\Delta u| > g$ 时, 任意像素的输出为黑色 (黑色对应 +1), 则 $y_{i,j}(\infty)$ 为 +1, 像素点 (i,j) 为边缘点.

局部规则 2: 当 $u_{i,j}$ 相邻八个像素点中至多有两个像素满足 $|\Delta u| > g$ 时, 任意像素的输出为白色 (白色对应 -1), 则 $y_{i,j}(\infty)$ 为 -1, 像素点 (i,j) 为非边缘点.

(4) CNN 数学分析

实际应用中, 取 $r = 1$, 根据标准 CNN 状态方程得到 CNN 的状态-输出方程具有如下形式:

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \underbrace{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 a_{k,l} y_{i+k,j+l}}_{g(x_{i,j})} + \underbrace{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 b_{k,l} u_{i+k,j+l}}_{w_{i,j}} + z$$

$$= g(x_{i,j}) + w_{i,j} \quad (2)$$

$$g(x_{i,j}) = -x_{i,j} + ay_{i,j} \quad (3)$$

$$w_{i,j} = z + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 b_{k,l} (u_{i+k,j+l}) \quad (4)$$

根据标准 CNN 输出方程得:

$$y_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if } x_{i,j} > 1 \\ x_{i,j}, & \text{if } -1 \leq x_{i,j} \leq 1 \\ -1, & \text{if } x_{i,j} < -1 \end{cases} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(3)可得:

$$g(x_{i,j}) = \begin{cases} -x_{i,j} + a, & \text{if } x_{i,j} > 1 \\ -x_{i,j} + ax_{i,j}, & \text{if } -1 \leq x_{i,j} \leq 1 \\ -x_{i,j} - a, & \text{if } x_{i,j} < -1 \end{cases} \quad (6)$$

将公式(6)代入公式 $\dot{x}_{i,j} = g(x_{i,j}) + w_{i,j}$ 可得:

$$\dot{x}_{i,j} = \begin{cases} -x_{i,j} + a + w_{i,j}, & \text{if } x_{i,j} > 1 \\ (a-1)x_{i,j} + w_{i,j}, & \text{if } -1 \leq x_{i,j} \leq 1 \\ -x_{i,j} - a + w_{i,j}, & \text{if } x_{i,j} < -1 \end{cases} \quad (7)$$

根据公式(7), 当过 $(-1, 0)$ 点时 $w_{i,j} = a-1$ 画出动力学曲线, 如图 2 所示的虚线 d_1 . 当过 $(1, 0)$ 点时 $w_{i,j} = 1-a$ 画出动力学曲线, 如图 2 所示的虚线 d_2 . 这两条动力学曲线属于临界状态的情况. 根据 $w_{i,j}$ 的不同取值范围, 可以得到三类动力学曲线:

① 当 $w_{i,j} > a-1$ 时, 动力学曲线在 d_1 上方的区域, 即在区域 I 中. 画出其中的一条动力学曲线, 如图 2 所示的曲线 c_1 , 它与 $x_{i,j}$ 轴有一个交点为 Q_1 .

② 当 $1-a \leq w_{i,j} \leq a-1$ 时, 动力学曲线在 d_1 和 d_2 之间的区域, 即在区域 II 中. 画出其中的一条动力学曲线, 如图 2 所示的曲线 c_2 , 它与 $x_{i,j}$ 轴有三个交点分别为 Q_2, Q_3, Q_4 .

③ 当 $w_{i,j} < 1-a$ 时, 动力学曲线在 d_2 下方的区域, 即在区域 III 中. 画出其中的一条动力学曲线, 如图 2 所示, 曲线 c_3 与 $x_{i,j}$ 轴有一个交点 Q_5 .

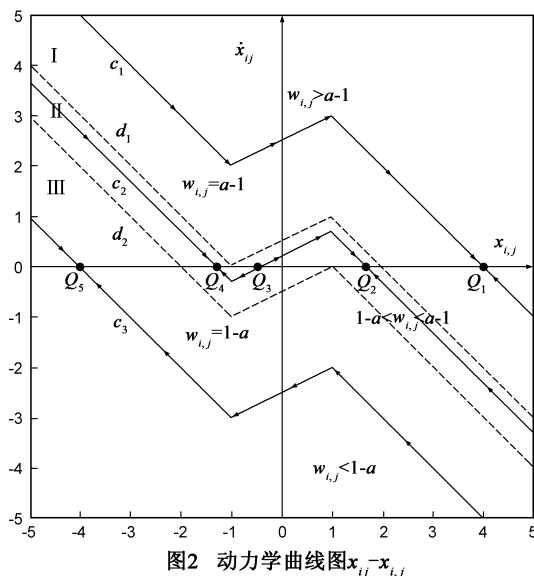


图2 动力学曲线图 $x_{i,j}-x_{i,j}$

对图 2 中动力学曲线方向的说明: ① 当动力学曲线在 $x_{i,j}$ 轴上方时 $\dot{x}_{i,j} > 0$, 动力学曲线向 $x_{i,j}$ 增大的方向移动直到 $\dot{x}_{i,j} = 0$ 时停止. ② 当动力学曲线在 $x_{i,j}$ 轴下方时 $\dot{x}_{i,j} < 0$, 动力学曲线向 $x_{i,j}$ 减小的方向移动直到 $\dot{x}_{i,j} = 0$ 时停止.

从图 2 可以看出:

① 动力学曲线 c_1 , 当 $x_{i,j}(0) \in (-\infty, \infty)$ 时沿着图

中箭头所示的方向移动,最终收敛点为 Q_1 点,由于 $w_{i,j} > a-1$ 则 Q_1 点的 $x_{i,j} > 1$,根据标准 CNN 输出方程可得 $y_{i,j}(\infty) = 1$.

②动力学曲线 c_2 与 $x_{i,j}$ 轴有三个交点 Q_2, Q_3, Q_4 , 当 $\dot{x}_{i,j} = 0$ 时 $(a-1)x_{i,j} + w_{i,j} = 0$ 可得到在 $x_{i,j}$ 上的交点 Q_3 的横坐标为 $-w_{i,j}/a-1$,需要考虑三种情况:

当 $x_{i,j}(0) = -w_{i,j}/a-1$ 时该点为收敛点,即 Q_3 点,因为 $\dot{x}_{i,j} = 0$,则该点不再移动,根据标准 CNN 输出方程可得 $y_{i,j}(\infty) = -w_{i,j}/a-1$;

当 $x_{i,j}(0) > -w_{i,j}/a-1$ 时沿着图中箭头所示的方向移动,最终收敛于 Q_2 点,该点的 $x_{i,j} \geq 1$,根据标准 CNN 输出方程可得 $y_{i,j}(\infty) = 1$;

当 $x_{i,j}(0) < -w_{i,j}/a-1$ 时沿着图中箭头所示的方向移动,最终收敛于 Q_4 点,该点 $x_{i,j} \leq -1$,根据标准 CNN 输出方程可得 $y_{i,j}(\infty) = -1$.

③动力学曲线 c_3 ,当 $x_{i,j}(0) \in (-\infty, \infty)$ 时沿着图中箭头所示的方向移动,最终收敛点为 Q_5 点,由于 $w_{i,j} < 1-a$,则 Q_5 点的 $x_{i,j} < -1$,根据标准 CNN 输出方程可得 $y_{i,j}(\infty) = -1$.

由上述分析可以得出:

$$y_{i,j}(\infty) = \begin{cases} 1, & \text{if } w_{i,j} > a-1, x_{i,j}(0) \in (-\infty, \infty) \\ 1, & \text{if } 1-a \leq w_{i,j} \leq a-1, x_{i,j}(0) > -\frac{w_{i,j}}{a-1} \\ -\frac{w_{i,j}}{a-1}, & \text{if } 1-a \leq w_{i,j} \leq a-1, x_{i,j}(0) = -\frac{w_{i,j}}{a-1} \\ -1, & \text{if } 1-a \leq w_{i,j} \leq a-1, x_{i,j}(0) < -\frac{w_{i,j}}{a-1} \\ -1, & \text{if } w_{i,j} < 1-a, x_{i,j}(0) \in (-\infty, \infty) \end{cases} \quad (8)$$

设 p_s 为满足 $|\Delta u| \leq g$ 条件的相邻像素的个数,设 p_d 为满足 $|\Delta u| > g$ 条件的相邻像素的个数.由公式(1)和公式(4)可得:

$$w_{i,j} = z - p_s + cp_d = z - (8 - p_d) + cp_d = z - 8 + (1+c)p_d$$

证明 1:根据局部规则 1,如果像素点 $u_{i,j}$ 有至少三个相邻的点满足条件 $|\Delta u| > g$,则 $y_{i,j}(\infty) = 1$.得到:

$$w_{i,j} = z - 8 + (1+c)p_d \geq z - 8 + (1+c)3$$

为了得到 $y_{i,j}(\infty) = 1$ 根据公式(8)需要满足 $w_{i,j} > a-1$ 或满足 $x_{i,j}(0) > -w_{i,j}/a-1$ 和 $1-a \leq w_{i,j} \leq a-1$,又因为定义 CNN 模板时取 $a > 1$,全局功能中已设定初始条件为 $x_{i,j}(0) = 0$,则:

$$\left. \begin{array}{l} a > 1 \\ w_{i,j} > a-1 \end{array} \right\} \Rightarrow w_{i,j} > 0$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{i,j}(0) = 0 \\ x_{i,j}(0) > -w_{i,j}/a-1 \end{array} \right\} \Rightarrow a > 1$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 > -w_{i,j}/a-1 \\ 1-a \leq w_{i,j} \leq a-1 \end{array} \right\} \Rightarrow 0 < w_{i,j} \leq a-1$$

$$(w_{i,j} > 0) \cup (0 < w_{i,j} \leq a-1) \Rightarrow w_{i,j} > 0$$

那么在 $x_{i,j}(0) = 0$ 的初始条件下,当且仅当 $w_{i,j} \geq z-8 + (1+c)3 > 0 \Leftrightarrow z+3c > 5$ 成立时, $y_{i,j}(\infty) = 1$.满足局部规则 1,得到 $z+3c > 5$.证明完毕.

证明 2:根据局部规则 2,如果像素点 $u_{i,j}$ 有至多两个相邻点满足条件 $|\Delta u| > g$,则 $y_{i,j}(\infty) = -1$.得到

$$w_{i,j} = z - 8 + (1+c)p_d \leq z - 8 + (1+c)2$$

为了得到 $y_{i,j}(\infty) = -1$,根据公式(8)需要满足 $w_{i,j} < 1-a$ 或 $x_{i,j}(0) < -w_{i,j}/a-1$ 和 $1-a \leq w_{i,j} \leq a-1$,则:

$$\left. \begin{array}{l} a > 1 \\ w_{i,j} < 1-a \end{array} \right\} \Rightarrow w_{i,j} < 0$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{i,j}(0) = 0 \\ x_{i,j}(0) < -w_{i,j}/a-1 \end{array} \right\} \Rightarrow a > 1$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 < -w_{i,j}/a-1 \\ 1-a \leq w_{i,j} \leq a-1 \end{array} \right\} \Rightarrow 1-a \leq w_{i,j} < 0$$

$$(w_{i,j} < 0) \cup (1-a \leq w_{i,j} < 0) \Rightarrow w_{i,j} < 0$$

那么在 $x_{i,j}(0) = 0$ 的初始条件下,当且仅当 $w_{i,j} \leq z-8 + (1+c)2 < 0 \Leftrightarrow z+2c < 6$ 成立时, $y_{i,j}(\infty) = -1$.满足局部规则 2,得到 $z+2c < 6$.证明完毕.

(5)定理 在上述模板条件下,CNN 满足彩色图像边缘检测的功能,当且仅当以下条件成立

$$\left. \begin{array}{l} a > 1 \\ z+3c > 5 \\ z+2c < 6 \end{array} \right\} \quad (9)$$

根据以上求解结果,可以根据情况在满足不等式组(9)的范围内选择合适的参数,当取 $c=2, z=1$ 的情况下,彩色图像边缘检测的结果如图 3 所示.可以看出采用不同的距离阈值 g ,对边缘的检测结果有较大影响.



(a) Peppers原图 (b) CNN检测结果($g=0.1$) (c) CNN检测结果($g=0.2$)

图3 基于CNN的边缘检测结果

2.2 基于 CNN 的分块自适应检测算法

上文讨论的 CNN 边缘检测算法,对彩色图像的边缘检测结果符合本文提出的彩色图像去噪方法对边缘检测结果的要求,原因如下:本算法基于彩色空间距离逐像素点计算(并行),所以边缘定位准确,无像素偏移问题,对噪声无抑制作用.CNN 可并行计算并且便于硬件实现.CNN 边缘检测结果非二值,为下一步的边缘滤波提供了条件.本算法在彩色空间内对彩色向量整体处理,充分利用彩色图像中携带的彩色信息.本节开始提出的(2)~(5)点要求都已经满足,接下来讨论如何能够根据图像中各个区域的性质自适应的选择合适的参

数进行边缘检测。

在 2.1 节的方法中,检测结果满足彩色图像去噪流程对边缘检测结果的要求,但仍然没有考虑图像不同区域性质的不同,对一幅图像采用一组网络参数,若选用较小的距离阈值 g ,图像中纹理丰富的区域检测出的边缘过多,不能很好的用来作为下一步有针对性去噪增强的依据,若通过增大 g 值来消除虚假边缘,图像平滑区域中的一些弱小边缘也会一同被除去,只能反映出图像大的轮廓边缘,不能很好的用来作为下一步图像去噪的依据。

鉴于以上不足,为了在确保边缘准确的同时,最大可能的去除伪边缘点,采用熵来度量图像的各个子区域的纹理性质,进而确定一组合适的网络参数。对于边缘较多的区域,采用比较大的 g 值,能够有效抑制伪边缘点的影响;对于平滑区域,采用比较小的 g 值,能够得到比较精细的边缘。

本文提出对整幅图像进行分块自适应检测,根据图像单元信息熵进行分块,从而达到分块自适应的目的。

综上所述,分块自适应边缘检测算法如下:

(1)将待分析的 $N \times M$ 的彩色图像,分成大小为 $n \times m$ 的若干子区域。

(2)计算图像各子区域的单元信息熵,并用熵值来判断该区域的纹理性质,RGB 图像的熵 H 等于三个分量的熵的和,表示为: $H = H_R + H_G + H_B$

(3)根据各子区域的性质,采用合适的 g 值。具体情况如下:①若该子区域为平滑区域,参数 g 取值为 0.1。②若该子区域为复合区域,参数 g 取值为 0.15。③若该子区域为边缘区域,参数 g 取值为 0.2。

(4)将常数 g 变成 $N \times M$ 的矩阵 G ,将 G 代入 2.1 节中得到的 CNN 模板中,得到新的 CNN 模板,新模板可以实现自适应的检测彩色图像的边缘。

对加入 0.05 椒盐噪声和 0.005 高斯噪声的 Pappers 图的分块自适应边缘检测结果如图 4 所示。可以看出检测结果对边缘定位准确,无像素偏移,对噪声无抑制作用,可以用于去噪过程中的噪声定位。

2.3 边缘滤波

边缘滤波是从备选边缘中找出“最重要”边缘的过程,如果考虑图像内容,找出“最重要”边缘需要相当复杂的算法^[14]。例如,在 Lena 图中,“最重要”边缘包括眼睛的边缘,因为这是 Lena 图中观察者视线主要停留的区域,同时这个区域也表达了图像内容中重要的信息。在本文的边缘滤波过程中将不考虑图像的内容信息。

本文设计的边缘滤波主要考虑以下几个要求:(1)过滤 $map A$ 中边缘强度小的边缘点。(2)过滤 $map A$ 中“短”的边缘链。(3)过滤 $map A$ 中“弱”的边缘链。边缘

滤波步骤如下:

(1)设定高、低阈值,边缘链长度阈值,边缘链强度阈值。

(2)连接相邻的边缘点,强度大于高阈值的点留下,强度小于低阈值的点去除,强度介于高低阈值之间的点,如果能与高阈值的点连接在一条边缘链上则留下,否则去除。得到若干条边缘链的集合。

(3)在步骤(2)的基础上过滤边缘链集合中长度小于边缘链长度阈值的边缘链。

(4)在步骤(3)的基础上过滤边缘链集合中平均强度小于边缘链强度阈值的边缘链。

在步骤(2)的边缘连接过程中需要注意以下问题:①连接过程中优先搜索使边缘走向光滑的点,例如边缘链中上一个边缘点在本边缘点的“左下”,则优先搜索本边缘点的“右上”位置,优先级其次是“右”位置、“上”位置,优先级再次是“左上”位置、“右下”位置,优先级最后是“左”位置、“下”位置。其他情况同理。②在优先级相同的情况下,在 8 邻域内优先搜索强度较大的边缘点。③边缘单链连接结束后还要返回起始点向相反方向搜索。④如果将边缘分支考虑进去,可以在主链连接结束后,依次以主链上每点作为起始点搜索分支,搜索到的分支点记入主链。此过程可递归,最好设置一个最大递归深度,避免递归次数过多。

$map A$ 经过边缘滤波后得到 $map B$, $map B$ 可以用来图像增强而不会带来彩色图像失真。对图 4(b)做边缘滤波后的边缘图见图 4(c)。

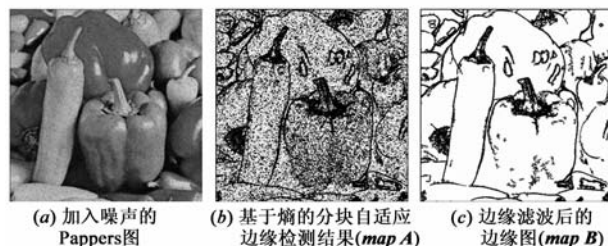


图4 边缘检测和边缘滤波结果

2.4 实验分析及评价

采用 512×512 彩色合成图加入 0.05 椒盐噪声进行测试,如图 5(a)所示,图中 A、B、C 三个区域亮度相同,色调和饱和度不同,则这三个区域具有相同的灰度级别。对图 5(a)边缘检测的对比结果如图 5(b)~(d)所示。可以看出:(1)图 5(b)和图 5(c)只检测出两条边缘线,图 5(c)的两条线属于标准的直线,而图 5(b)的两条线受到噪声的干扰呈现小的波浪线。证明了,基于 CNN 的边缘检测定位准确,无像素偏移。(2)图 5(d)检测出所有的边缘,为直线。非边缘区域产生的伪边缘较少。证明了,彩色边缘检测能获得更多的边缘信息,漏减率低,不致因噪声造成虚假检测。(3)图 5(d)的四周

有边缘线,这是由于采用了循环边界条件形成的。

为了定量的分析该算法的优越性,采用文献[15]中所用的定量评价标准.表1列出了用实验中各种算法对合成图加入不同密度的椒盐噪声所得到的评价指标值.从表中可以看出随着噪声密度的增加,本文算法的 FOM 值明显大于其它算法的 FOM 值,这说明本文算法在对含有噪声图像进行边缘检测时,对强噪声的去噪效果更加明显。

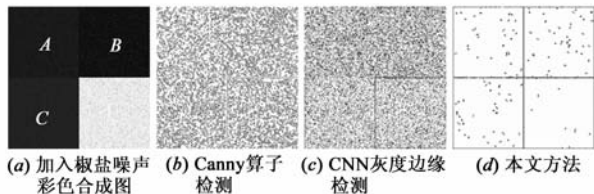


图5 加噪合成图的边缘检测结果

表1 检测结果的 FOM 值比较

噪声密度 (椒盐)	Canny 检测	CNN 灰度检测	CNN 彩色分块 自适应检测
0.05	0.8213	0.8563	0.9584
0.3	0.7421	0.7742	0.9183
0.5	0.6347	0.6908	0.8609

3 彩色图像去噪

一些彩色图像去噪算法工作在 RGB 彩色空间或者 YcbCr 彩色空间.但是在这些空间中,亮度分量和色度分量不是独立的,改变其中之一会带来亮度分量和色度分量的同时改变.因此在 RGB 彩色空间或者 YcbCr 彩色空间中,图像平滑的同时会产生新的颜色,带来颜色混乱. CIELAB 彩色空间通过径向距离和角度分别表示颜色的饱和度和色调.这使得在 CIELAB 彩色空间中更容易操作亮度分量和保持颜色的一致性。

3.1 改进的双边滤波

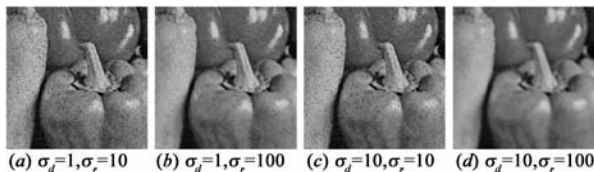


图6 对图4(a)双边滤波去噪结果

对图4(a)的双边滤波去噪结果见图6.可以看出,随着 σ_r 和 σ_d 的增大,噪声被去除的同时图像也变得模糊了.尽管双边滤波可以在一定程度保持图像的高频细节,但是仍然会使图像变模糊.为了进一步降低双边滤波对图像清晰度的影响,本文提出对双边滤波的一种改进算法.主要改进如下:

(1)利用2.2节中边缘检测得到 $map A$,通过 $map A$ 估计噪声范围,仅对 $map A$ 中等于1的像素点做双边滤波.见公式(10),其中 $f(x_{i,j})$ 为 $M \times N$ 的原图像, $h_b(x_{i,j})$ 为双边滤波输出图像。

(2)噪声的污染点本身的值不具有参与平滑的价值,将其加权系数置0.见公式(11),其中 $s(\epsilon, x)$ 表示彩色空间向量 $f(\epsilon)$ 与 $f(x)$ 之间的相似度, $c(\epsilon, x)$ 表示平面坐标 ϵ 与 x 之间的相似度。

(3)将噪声的污染点 $f(x_{i,j})$ 与附近点 $f(\epsilon)$ 之间的彩色空间距离修改为 $f'(x_{i,j})$ 与点 $f(\epsilon)$ 之间的彩色空间距离, $f'(x_{i,j})$ 为 $f(x_{i,j})$ 空心邻域的 CIELAB 彩色空间向量均值,见公式(14).双边滤波输出图像 $h_b(x_{i,j})$ 修改为公式(12). $k_b(x)$ 为归一化因子,见公式(13)。

$$h(x_{i,j}) = \begin{cases} h_b(x_{i,j}), & \text{if } e_{i,j}^B = 1 \\ f(x_{i,j}), & \text{if } e_{i,j}^B = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$s(f'(x_{p,q}), f(x_{i,j})) = 0, c(x_{p,q}, x_{i,j}) = 0 \quad (11)$$

$$\text{if } e_{i,j}^B = 1 \text{ and } p = i \text{ and } q = j$$

$$h_b(x_{i,j}) = k_b^{-1}(x_{i,j}) \times$$

$$\sum_{p=i-m}^{i+m} \sum_{q=j-n}^{j+n} f(x_{p,q}) \times c(x_{p,q}, x_{i,j}) \times s(f(x_{p,q}), f'(x_{i,j})) \quad (12)$$

$$k_b(x_{i,j}) = \sum_{p=i-m}^{i+m} \sum_{q=j-n}^{j+n} s(f(x_{p,q}), f'(x_{i,j})) \times c(x_{p,q}, x_{i,j}) \quad (13)$$

$$f'(x_{i,j}) = (m * n - 1)^{-1} \times \sum_{p=i-m, p \neq i}^{i+m} \sum_{q=j-n, q \neq j}^{j+n} f(x_{i,j}) \quad (14)$$

对图4(a)的本文方法去噪结果如图7所示.可以看出,随着 σ_r 和 σ_d 的增大,噪声被更好去除的同时图像的清晰度未见明显损失。

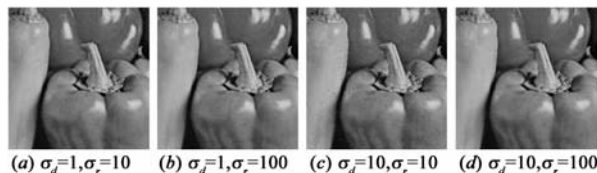


图7 对图4(a)改进的双边滤波去噪结果

4 彩色图像去噪后增强

尽管在上面的去噪过程中,彩色图像的边缘信息被很大程度的保留,但是现实系统中得到的彩色图像仍然会有一定程度的模糊.造成图像模糊的原因主要有以下几个:(1)目标位置移动造成的镜头聚焦不准;(2)目标移动引起的成像模糊;(3)光学镜头的非理想性引起的成像模糊,尤其在图像的四角位置.因此彩色图像去噪后的增强环节是必要的。

采用一种简单有效的彩色图像增强方法^[5].利用前面得到的边缘滤波后的边缘图 $map B$,仅对对应边缘点的亮度分量进行增强.由于本文提出的边缘检测算法得到的不是单像素边缘,事实上是包含边缘两边很小区域的“边缘邻域”.在“边缘邻域”内扩大边缘两侧的亮度差,就可以达到增强图像的效果.具体做法如下:利用上节边缘滤波得到的边缘图 $map B$,仅对边缘图 $map B$ 中等于1的像素点做增强,其中 ϕ 为亮度值

的增强比例.大于邻域均值的点按比例增加其亮度,小于邻域均值的点按比例减小其亮度,见公式(15)、(16).

$$L^E(x_{i,j}) = \begin{cases} L(x_{i,j}) + \phi L(x_{i,j}), & \text{if } (e_{i,j}^C = 1) \text{ and } (L(x_{i,j}) > \theta_{i,j}) \\ L(x_{i,j}) - \phi L(x_{i,j}), & \text{if } (e_{i,j}^C = 1) \text{ and } (L(x_{i,j}) < \theta_{i,j}) \\ L(x_{i,j}), & \text{if } (e_{i,j}^C = 0) \text{ or } (L(x_{i,j}) = \theta_{i,j}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\theta_{i,j} = \frac{1}{9} \sum_{i-1}^{i+1} \sum_{j-1}^{j+1} L(x_{p,q}) \quad (16)$$



图8 对图7(d)增强后的图(本文算法最终结果)
 $\sigma_d=10, \sigma_r=100$

5 实验结果及分析

彩色图像去噪要求在去除噪声的同时尽可能保留图像的细节和纹理.为了检验本文方法的有效性,进行了大量的实验.使用不同图像分别加入不同密度的噪声对本文方法进行了测试,本文方法对脉冲噪声和高斯噪声都有很好的去噪效果.双边滤波去噪结果与本文算法去噪结果的比较见图9及表2.

加入噪声的图像
噪声密度(椒盐+高斯) 双边滤波去噪结果
 $\sigma_d=10, \sigma_r=100$ 本文算法去噪结果
 $\sigma_d=10, \sigma_r=100$

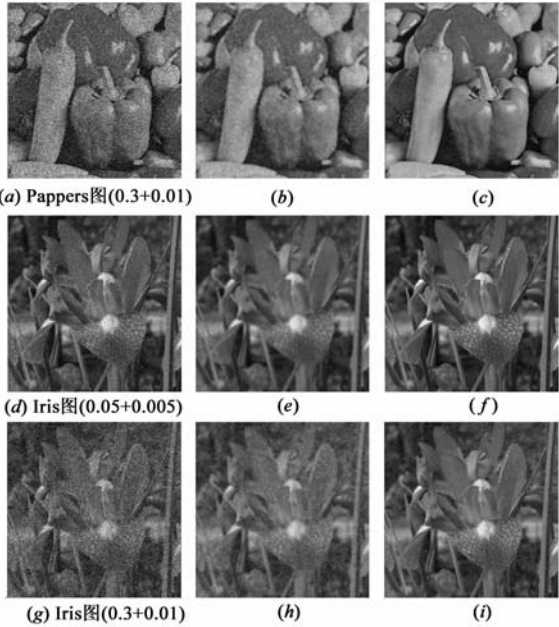


图9 双边滤波去噪结果与本文算法去噪结果的比较

表2 双边滤波去噪结果与本文算法去噪结果的 PSNR 值比较(单位:db)

图片	噪声密度 (椒盐+高斯)	σ_d, σ_r	通道	噪声图像	双边滤波 去噪结果	本文方法 去噪结果
Peepers	0.05 + 0.005	1, 10	R	17.45	18.16	33.10
			G	16.96	17.35	30.89
			B	17.02	17.53	32.48
	0.05 + 0.005	1, 100	R	17.45	26.60	34.14
			G	16.96	24.30	31.88
			B	17.02	25.20	33.77
	0.05 + 0.005	10, 10	R	17.45	18.91	28.83
			G	16.96	17.59	26.34
			B	17.02	17.89	27.27
	0.05 + 0.005	10, 100	R	17.45	26.83	34.14
			G	16.96	24.00	31.88
			B	17.02	26.11	33.77
	0.3 + 0.01	10, 100	R	10.82	21.12	24.37
G			10.11	17.62	20.22	
B			10.14	18.46	21.16	
Iris	0.05 + 0.005	10, 100	R	17.64	27.13	35.34
			G	17.68	27.62	35.32
			B	16.93	25.96	34.55
	0.3 + 0.01	10, 100	R	11.07	19.16	22.69
			G	10.96	20.94	23.33
			B	10.13	19.19	22.08

实验表明,在噪声密度较低的情况下,本文方法在去除噪声的同时图像的清晰度未见明显损失.在噪声密度较高的情况下,本文方法在去除噪声的同时图像的清晰度有一定损失,原因是彩色图像在三个通道独立加噪的情况下,任意一个通道被污染就会造成整个像素的污染,30% 的噪声往往带来 65% 以上的像素被污染.为了检验本文方法的去噪效果,用该方法与其它基于双边滤波的去噪方法进行对比实验.实验结果见图 10.为了验证本文算法在实际应用中的效果,图 11 人脸图像为视线追踪系统中用于面部位姿估计和平面视线参数检测的图像.视线追踪需融合人脸特征提取、眼部特征识别等多种生物特征识别技术,关键技术包括瞳孔分割及中心定位、瞳孔跟踪、人脸多特征检测及跟踪等.在图像采集和传输过程中由于头部活动和量化处理造成成像模糊与噪声.在实时视线追踪系统中对人脸图像进行预处理,去噪结果见图 11.

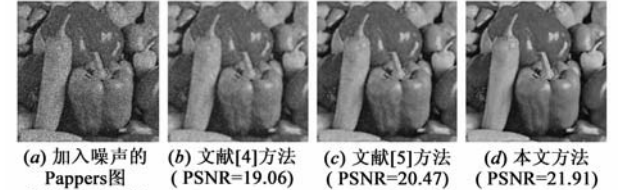


图10 其它双边滤波方法去噪结果与本文算法去噪结果的比较

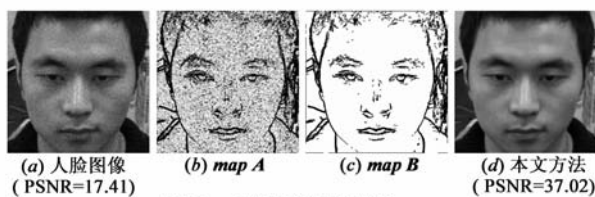


图11 人脸图像去噪结果

6 结论

彩色图像的去噪增强是一个数字图像系统必须面对的实际问题. 本文提出一种基于边缘检测和双边滤波的彩色图像去噪及图像增强的方法. 本方法具有以下特点: (1) 通过两级边缘检测满足去噪不同阶段对边缘检测的不同要求. 通过非抗噪边缘检测改进双边滤波, 减少去噪过程带来的图像模糊. 对去噪后的彩色图像进行基于滤波后边缘增强, 补偿去噪过程中边缘的损失. (2) 根据方法各个阶段的需要, 不同的彩色空间在方法中被使用. 在 RGB 彩色空间进行边缘检测以定位边缘及噪声, 在 CIELAB 彩色空间去噪以保持颜色的一致性, 仅对亮度分量 (L^*) 进行增强以避免颜色的混乱与失真. (3) 该方法的各个环节都可以通过硬件实现, 为实时系统的图像前期处理提供了依据.

参考文献:

- [1] Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filters[J]. Proc IEEE, 1990, 78(4): 678 – 689.
- [2] Trahanias P, Venetsanopoulos A. Vector directional filters—A new class of multichannel image processing filters[J]. IEEE Trans Image Process, 1993, 2(4): 528 – 534.
- [3] R Lukac, Adaptive color image filtering based on center-weighted vector directional filters[J]. Multidimensional Syst Signal Processing, 2004, 15(2): 169 – 196.
- [4] C Tomasi, R Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision [C]. New Delhi: IEEE Computer Society, 1998. 839 – 846.
- [5] Wen-Chung Kao, Ying-Ju Chen. Multistage bilateral noise filtering and edge detection for color image enhancement[J]. IEEE Trans Consumer Electronics, 2005, 51(4): 1346 – 1351.
- [6] F Russo, A Lazzari. Color edge detection in presence of Gaussian noise using nonlinear prefiltering[J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 2005, 54(1): 352 – 358.
- [7] Pei S C, Cheng C M. Color image processing by using binary quaternion moment-preserving thresholding technique[J]. IEEE Trans Imaging Processing, 1999, 8(5): 614 – 628.

- [8] Trahanias P, Venetsanopoulos A N. Color edge detection using vector statistics[J]. IEEE Trans Image Processing, 1993, 2(4): 259 – 264.
- [9] Jian Fan. A local orientation coherency weighted color gradient for edge detection[A]. 2005 International Conference on Image Processing [C]. Genova: IEEE, 2006. III – 1132 – 5
- [10] Dony R D, Wesolkowski S. Edge detection on color images using RGB vector angle[A]. Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering [C]. Edmonton, Canada: IEEE, 1999. 289 – 292.
- [11] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital Image Processing[M]. Beijing: Pearson Education, 2003: 224 – 246.
- [12] L O Chua, L Yang. Cellular neural networks: Theory and applications [J]. IEEE Trans Circuits Syst, 1988, 35(10): 1257 – 1290.
- [13] L O Chua. CNN: A vision of complex [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1997, 7(10): 2219 – 242.
- [14] Mallat S, Zhang S. Characterization of signals from multiscale edges[J]. IEEE Trans PAMI, 1992, 14(7): 710 – 732.
- [15] I E Abdou, W K Pratt. Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors [J]. Proc IEEE, 1979, 67(5): 753 – 763

作者简介:



张 闯 男, 1967 年生于辽宁鞍山, 北京科技大学信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为图像处理与分析、视线追踪、人工智能、模式识别.

E-mail: zhangchuangtc@163.com



迟健男(通信作者) 男, 1967 年生于辽宁沈阳, 北京科技大学信息工程学院副教授, 博士后, 主要研究方向为: 图像处理与分析、计算和视觉、嵌入式系统、智能控制技术、光学测试与计量等.

E-mail: sy-jnchi@126.com

张朝晖 男, 1965 年生于河北, 北京科技大学信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 图像处理与分析、信号处理、太赫兹波检测技术、嵌入式测量仪器.

王志良 男, 1956 年生于河南, 北京科技大学信息工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 人工心理、机器人、人脸识别、虚拟现实、数字人.