

一种数字图像盲增强的新算法

李远清¹, 张丽清²

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641; 2. 上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200030)

摘要: 给出一种数字图像盲增强的新算法. 其中源数字图像及其灰度级未知, 已知的仅仅是被噪声污染了的图像. 该算法首先估计密度函数, 然后估计图像的灰度级, 最后去噪声重建图像, 达到图像增强的目的. 仿真例子说明了该算法的有效性.

关键词: 数字图像; 概率密度; 磨光; 图像增强

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

New algorithm for blind enhancement of digital images

LI Yuan-qing¹, ZHANG Li-qing²

(1. College of Automation Engineering and Science, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou 510641, China;

2. Computer Science and Engineering Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A new algorithm for blind enhancement of digital images was presented. While the corrupted image was known, the source image and its gray levels were unknown. The probability density function was firstly estimated. Then the gray levels were also estimated. Finally, the corrupted image was denoised and reconstructed, and the image enhancement was accomplished. The simulation results help confirm the validity of the algorithm.

Key words: digital image; probability density function (PDF); smoothing; image enhancement

1 引言 (Introduction)

图像增强是图像处理的一个重要研究课题, 其目标是要提高图像的视觉效果, 及便于进一步处理. 图像增强的方法主要可分为两大类: 1) 空间域运算(与各种线性滤波器的卷积); 2) 频率域运算(在频率域滤波, 如维纳滤波器等)^[1-4].

信号盲处理是当今信号处理研究的热点之一, 具有广泛的应用前景^[5-8]. 本文讨论数字图像盲增强问题, 问题模型如下:

$$x(i, j) = s(i, j) + v(i, j), \quad (1)$$

其中, s 为未知的源数字图像, 其灰度级也是未知的, v 为零均值, 方差为 σ^2 的高斯白噪声, x 为已知的被污染了的图像. 图像增强的目的就是要对 x 去噪声.

2 数字图像盲增强算法 (Algorithm for blind enhancement)

本节首先估计密度函数, 并对其磨光, 然后利用密度函数估计图像的灰度级, 最后总结出图像增强

算法.

2.1 密度函数估计与磨光 (Estimation and smoothing of PDF)

注意到这样的事实: 一个随机变量服从零均值高斯分布, 则其样本点主要在原点附近. 如: v 服从一维标准正态分布, 则事件 $\{|v| > 3\}$ 的概率小于 0.05. 对模型 (1), 将 x, v 看成一维随机变量的样本点, (i, j) 为样本点的编号. 设 s 的取值为 $a_1, a_2, \dots, a_N$ (灰度级), 只要噪声能量不是特别大, 则 x 的密度函数在 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 处有最大值 (如图 1 第一行第一个图). 事实上, 可以证明, 模型 (1) 输出的概率密度函数为:

$$p(x) = \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a_i)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

其中 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 为 N 个不同的灰度值, p_i 为 s 取灰度值 a_i 的概率. 当噪声在一定的界限下, 密度函数 $p(x)$ 有 N 个不同的峰值. 如果噪声过大, 则有些峰值会消失.

本文估计密度函数 $p(x)$. 假定有 N_0 个样本点组成集合 X , 其中 $N \ll N_0 \leq I \times J$, $I \times J$ 为图像的维数. X 的最大值与最小值分别计为 a, b . 将区间 $[a, b]$ 等分为 M 个子区间 $[a + i\delta, a + (i + 1)\delta]$, $i = 0, \dots, M - 2$, 及 $[a + (M - 1)\delta, b]$, 此处 $\delta = (b - a)/M$, 且 M 充分大. 统计 X 中样本点落在各子区间的数目, 记 n_i 为第 i 个子区间的样本点数, 则 x 属于第 i 个子区间的概率为 $p'_i = \frac{n_i}{N_0}$, $i = 1, \dots, M$. 图 1(d) 为这样估计的一个密度函数, 其中 $M = 300$.

从图 1(d) 注意到, 用上述方法估计的密度函数还很不光滑, 不便寻找峰值所在位置, 需要进行磨光处理.

本文用如下滤波器对密度函数磨光(有时, 根据需要, 可能要重复几次):

$$p_k = \frac{1}{16}[p'_{k-2} + 4p'_{k-1} + 6p'_k + 4p'_{k+1} + p'_{k+2}]. \tag{3}$$

上述滤波器能磨光函数, 且保证峰顶和谷底的位置不变. 图 1(e) 为对估计的密度函数磨光后的结果.

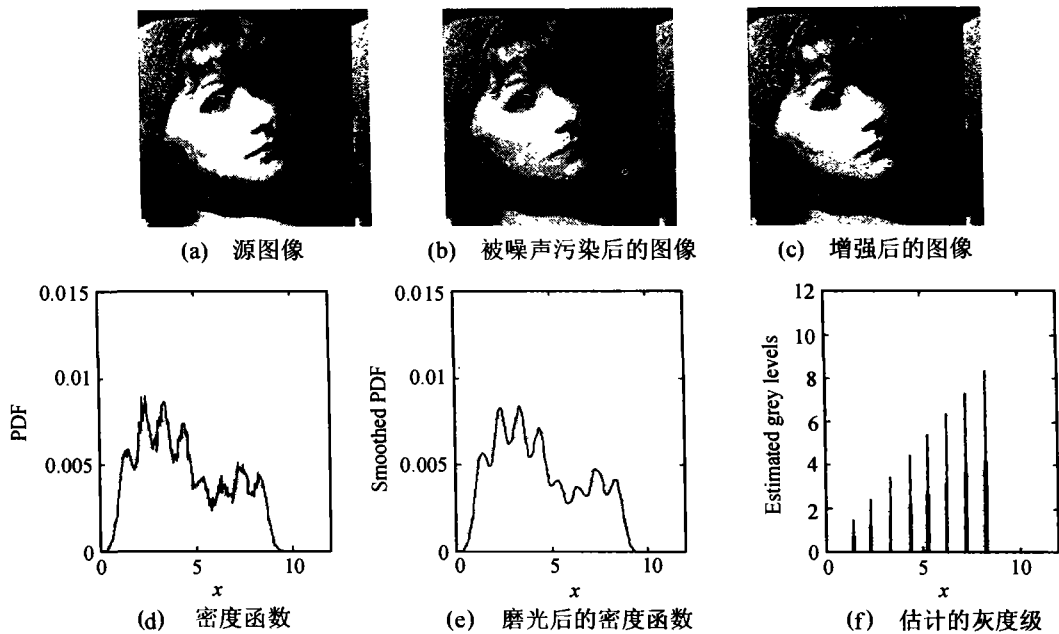


图 1 例 1 的处理结果
Fig. 1 The processing result in Example 1

2.2 灰度级估计(Estimation of grey scales)

本文用如下准则(“爬山法”的思想)寻找磨光了的密度函数 N 个峰值.

准则 1 如果如下三个条件满足,

- 1) $p_i + p_{i+1} + p_{i+2} \leq p_{i+1} + p_{i+2} + p_{i+3}$;
- 2) $p_{i+1} + p_{i+2} + p_{i+3} > p_{i+2} + p_{i+3} + p_{i+4}$;
- 3) $p_{i+1} > n_0/N_0$, 或 $p_{i+2} > n_0/N_0$, 或 $p_{i+3} > n_0/N_0$;

则 p_{i+2} 被当成一个峰值, 其中或 n_0 为预先给定的一个正整数. 另外, 如果 $p_1 + p_2 + p_3 > p_2 + p_3 + p_4$, 且 $p_1 > n_0/N_0$, 或 $p_2 > n_0/N_0$, 或 $p_3 > n_0/N_0$, 则 p_2 为一个峰值. 如果 $p_{M-2} + p_{M-1} + p_M > p_{M-3} + p_{M-2} + p_{M-1}$, 且 $p_{M-2} > n_0/N_0$, 或 $p_{M-1} > n_0/N_0$, 或 $p_M > n_0/N_0$, 则 p_{M-1} 为一个峰值.

假定寻找到的 N 个峰值为 $p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_N}$. 令

$$\bar{a}_1 = a + (i_1 + \frac{1}{2})\delta, \dots, \\ \bar{a}_N = a + (i_N + \frac{1}{2})\delta,$$

这便是估计到的源图像的 N 个灰度级. 图 1(f) 为估计的 8 个灰度级. 当所有灰度级估计完毕后, 便可用如下准则对 x 去噪声了:

准则 2 对 $x(i, j)$, 如果 $\bar{a}_{i_0} = \arg \min \{|x(i, j) - \bar{a}_k|, k = 1, \dots, N\}$, 则令 $\bar{s}(i, j) = \bar{a}_{i_0}$, $\bar{s}$ 即为重建图像.

2.3 算法(Algorithm)

总结本节前两部分的论述, 给出本文的算法步骤:

- 1) 估计密度函数;

2) 对密度函数磨光;

3) 搜索密度函数的峰值(准则1),并估计源图像灰度级;

4) 对被噪声污染了的图像去噪声(准则2).

注1 1) 在上述算法中,源图像的灰度级是未知的,其实灰度级个数也不需要知道,故称之为“盲增强”算法.如果预先知道图像的灰度级,则直接利用算法中去噪声步骤;2) 虽然上述算法是针对灰度图像的,但可以方便地扩展用于处理彩色图像.只要将“RGB”三色分开处理,再将重建结果合成即可.

3 仿真例子(Simulation examples)

除了对比图像增强前后的视觉效果外,本文还要比较处理前后的误符号率,以证实本文算法的有效性.例1对一个灰度图像进行增强;例2分析误符号率与噪声的关系.

作者发现,影响误符号率的关键因素不仅仅是信噪比,与各灰度级的差也有很大关系.故这里用如下参数衡量噪声:

$$SDR = 10 \log_{10} \frac{d^2}{\sigma^2}, \quad (4)$$

其中, d 为临近两个灰度级之间的最小距离.

如果重建后图像的某一像素与源图像对应像素之差满足:

$$|\bar{s}(i, j) - s(i, j)| > 0.05, \quad (5)$$

则称在 (i, j) 处发生了一个错误符号.对被噪声污染了的图像,误符号率的计算也用类似标准.

例1 用本文中的算法对被噪声污染了的图像进行增强.如图1中:(a)图为源图像,(b)图为被噪声污染了的图像,(c)图为增强后的图像;(d)图为估计的密度函数;(e)图为对密度函数磨光后的结果;(f)图为估计的灰度级.其中, $SDR = 9.1$ dB, 处理前误符号率 $CER_1 = 88.65\%$, 估计的灰度级为: 0.1350, 1.0550, 2.0550, 3.0950, 4.0150, 4.9750, 5.9750, 7.0150(实际上为:0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).可见,灰度级的估计值与真实值有微小误差,根据数字图像灰度级的取值规律,对估计值取整,得到真实值.增强后误符号率 $CER_2 = 14.18\%$.

例2 本例分析用本文给出的算法进行图像增强时,误符号率的降低与噪声的关系.图2为不同 SDR 下实验结果,其中,源图像见图1.图2横坐标为 SDR ,纵坐标为误符号率.并且,在 $SDR < 8.84$ dB时,所估计的灰度级与真实值有较大出入,甚至个数也不对.在 $SDR > 17.31$ dB时,误符号率降为0.

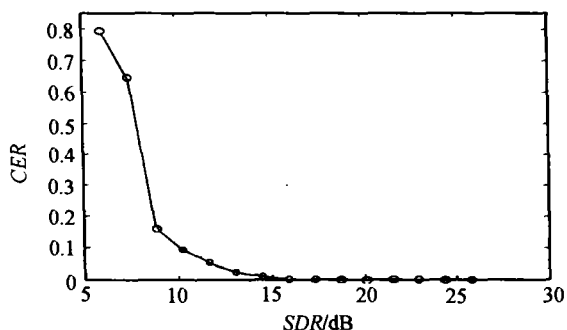


图2 误符号率 vs SDR 曲线

Fig. 2 Curve of code error rate vs SDR

4 结束语(Concluding remarks)

在源数字图像及其灰度级未知,已知的仅仅是被噪声污染了的图像的情形下,本文给出一种数字图像盲增强的新算法.首先估计密度函数并对其磨光,然后利用密度函数估计图像的灰度级,最后去噪声重建图像,达到图像增强的目的.最后,给出了两个仿真例子,说明了该算法的有效性.该算法的特点一是计算较为简单,二是容许的噪声较大,且当噪声小到一定程度后,误符号率可以降为0.

对该算法有几点说明:

1) 计算时间容取得条件下,估计密度函数时,区间分划尽可能细,以便准确估计密度函数;

2) 为了顺利搜索密度函数的峰值,估计灰度级,磨光滤波器的阶数不宜过低(本文的磨光滤波器为5阶),磨光次数不宜过少;

3) 噪声过大,密度函数的有些峰值会消失,源图像的灰度级难以正确估计,图像增强效果会大受影响,但从本文的仿真实验来看,本文算法容许的噪声也是相当大的;

4) 本文算法不仅对高斯噪声适用,对其它密度函数为单峰函数的噪声也是适用的(如:服从Laplace分布的噪声);

5) 本文算法可以扩展,用来处理彩色数字图像盲增强问题.

参考文献(References):

- [1] SMOLKA B, WOJCIECHOWSKI K W. Random walk approach to image enhancement [J]. *Signal Processing*, 2001, 81(3): 465 - 482.
- [2] LEE Winlong, FAN Kuochin. Document image preprocessing based on optimal Boolean filters [J]. *Signal Processing*, 2000, 80(1): 45 - 55.
- [3] 王晖, 张基宏. 图像边界检测的区域对比度模糊增强算法[J].

电子学报, 2000, 28(1): 45 - 47.

(WANG Hui, ZHANG Jihong. Fuzzy contrast enhancement algorithms for image edge detection [J]. *J of Electronics*, 2000, 28(1): 45 - 47.)

- [4] CHENG H D, CHEN Yenhong, SUN Ying. A novel fuzzy entropy approach to image enhancement and thresholding [J]. *Signal Processing*, 1999, 75(2): 277 - 301.
- [5] MOAYERI N, KONSTANTINIDES K. *Blind restoration of blurred and noisy images* [R]. [s.l.]: Hewlett-Packard Laboratories, 1996.
- [6] PAJUNEN P. Blind separation of binary sources with less sensors than sources [A]. *Proc of 1997 Int Conf on Neural Networks* [C]. Houston, Texas: [s.n.], 1997.
- [7] PUNTONET C, PRIETO A, JUTTEN C, et al. A geometry-based procedure for reconstruction of n -value signals [J]. *Signal Processing*, 1995, 46(2): 267 - 284.
- [8] LI Yuanqing, WANG J, ZURADA J M. Blind extraction of singularly mixed source signals [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*,

2000, 11(6): 1413 - 1422.

作者简介:

李远清 (1966 —), 男, 1988 年武汉大学数学系本科毕业, 1992 年华南师范大学数学系硕士毕业, 1997 年华南理工大学电子信息学院博士毕业, 华南理工大学自动化科学与工程学院副教授, 硕士生导师, 目前正在日本脑科学研究所高级脑信号处理试验室从事合作研究, 主要研究领域: 滞后广义系统, 神经网络, 信号盲处理, 视觉计算. E-mail: liyuan@bsp.brain.riken.go.jp;

张丽清 (1961 —), 男, 1983 年杭州大学数学系毕业, 获理学学士, 1988 年中山大学计算机科学系毕业, 获理学博士学位, 1988 ~ 1997 年在华南理工大学自动化科学与工程学院任讲师、副教授、教授, 1996 年, 被批准为控制理论与控制工程学科的博士生导师, 1997 ~ 2002 年在日本脑科学综合研究中心任研究员, 现为上海交通大学计算机科学与工程系教授, 主要研究领域: 大脑学习与记忆理论, 集成计算认知, 计算视觉, 机器学习.

(上接第 524 页)

- [3] SAMPATH M, LAFORTUNE S, TENEKETZIS D. Active diagnosis of discrete event systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(7): 908 - 929.
- [4] RICKER S L, FABRE E. On the construction of modular observers and diagnosers for discrete-event systems [A]. *Proc of 39th Conf Decision and Control* [C]. Sydney: IEEE Control Systems Society, 2000: 2240 - 2244.
- [5] FABRE E, AGHASARYAN A, BENVENISTE A, et al. Fault detection and diagnosis in distributed systems: an approach by partially stochastic petri nets [J]. *J of Discrete Event Dynamic Systems*, 1998, 8(2): 203 - 231.
- [6] LIN F. Diagnosibility of discrete-event systems and its applications [J]. *J of Discrete Event Dynamic Systems*, 1994, 4(2): 197 - 212.
- [7] 吴旋. 基于离散事件动态系统的故障诊断理论的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
(WU Xuan. *Research on fault diagnosis of discrete event dynamic systems* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.)
- [8] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, et al. Diagnosibility of discrete event systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 40(9): 1555 - 1575.
- [9] RAMADGE P J, WOHAM W M. Supervisory control of a class of discrete event processes [J]. *SIAM J of Control Optimal*, 1987, 25

(1): 206 - 230.

- [10] FABRE E, BENVENISTE A, JARD C, et al. Distributed state reconstruction for discrete-event systems [A]. *Proc of 39th Conf Decision and Control* [C]. Sydney: IEEE Control Systems Society, 2000: 2252 - 2257.
- [11] CIESLAK R, DESCLAUX C, FAWAZ A S, et al. Supervisory control of discrete-event process with partial observations [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(3): 249 - 259.

作者简介:

吴旋 (1977 —), 男, 1999 年毕业于厦门大学计算机系, 2002 年毕业于浙江大学控制科学与工程学系控制理论与控制工程专业, 获硕士学位, 2002 年开始工作于福建实达电脑设备有限公司. 攻读研究生期间研究方向: 离散事件动态系统及其故障诊断理论的研究. E-mail: wuxuan@start.com.cn;

颜文俊 (1965 —), 男, 1994 年在浙江大学工业控制技术研究所取得博士学位, 1996 年在浙江大学从事博士后工作, 2001 年 ~ 2002 年作为访问学者在英国 Cranfield 大学从事研究. 现为浙江大学系统科学与工程系副主任, 副教授. 主要研究方向: 复杂系统的多目标优化与控制, 离散事件系统的监控理论, 各类控制系统的工业应用等. E-mail: yanwenjun@zju.edu.cn.