

一种改进的模拟退火图像盲复原算法

张红英, 彭启琮

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

【摘要】通过分析均匀分布与Cauchy分布的分布机制,提出了一种改进的模拟退火图像盲复原算法,该算法选择Cauchy分布为随机扰动量来产生状态扰动函数。通过计算机仿真,验证了该算法对初值的鲁棒性和复原的效果优于基于均匀分布随机扰动量模拟退火盲解卷积算法,提高了收敛到最优解的速度。

关键词 图像复原; 盲复原; 盲解卷积; 模拟退火; Cauchy分布
中图分类号 TP391 文献标识码 A

An Improved Simulated Annealing Algorithm for Blind Image Restoration

ZHANG Hong-ying, PENG Qi-cong

(School of Communication and Information Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract After analyzing the distribution mechanisms of uniform distribution and Cauchy distribution, an algorithm of blind image restoration by simulated annealing based on Cauchy distribution random perturbation is proposed. Simulation results show that the improved method has better quality, robustness and speed of convergence comparing with simulated annealing algorithm based on uniform distribution random perturbation.

Key words image restoration; blind restoration; blind deconvolution; simulated annealing; Cauchy distribution

模拟退火算法是基于Monte Carlo迭代求解策略的一种随机寻优算法,从原则上说具有全局收敛性。McCallum在文献[1]中将该算法首次用于图像的盲解卷积,获得了较好的恢复效果。但该算法对初值的鲁棒性不强,收敛到全局最优的速度很慢。本文从理论上分析了影响模拟退火算法效率的关键因素,对比了均匀(Uniform)分布与柯西(Cauchy)分布的分布机制,对McCallum的算法进行了改进,选择Cauchy分布作为状态产生函数的随机扰动量,提出了一种基于Cauchy分布随机扰动量的模拟退火图像盲复原算法。通过计算机仿真,验证了该算法对初值的鲁棒性要优于McCallum的方法,并且收敛到最优解的速度要比McCallum的方法快两倍。

1 基于Cauchy分布随机扰动量的模拟退火图像盲复原算法

文献[1]将模拟退火算法用于最小化以下代价函数:

$$\begin{cases} Q(f, h) = \text{En}\{f * h - g\} / \text{En}\{g\} \\ \text{s.t. } f \in D_f, h \in D_h \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\text{En}\{a\} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} [a(i, j)]^2$; D_f , D_h 分别为 $f(i, j)$ 和 $h(i, j)$ 的有限支撑域。采用Metropolis抽样算法,计算从一对起始猜测 $f(i, j)$ 和 $h(i, j)$ 开始,对它们按扫描方式逐元进行随机扰动(扰动量服从 $[-0.5, 0.5]$ 上的均匀分布),扰动的均方根是固定的,同时计算代价函数 Q 的值。如果代价函数下降,则接受扰动;否则就按概率 $p = \exp(-\Delta Q / T_k)$ 接受扰动,其中, ΔQ 是代价函数的变化量; T_k 是当前的温度。做法是产生一个 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 ξ 。如果 $p > \xi$,则接受扰动,并转到下一个元,否则,不接受扰动,转到下一个元。

收稿日期: 2004-05-31

作者简介: 张红英(1976-),女,博士生,主要从事盲信号与图像处理, DSP技术方面的研究; 彭启琮(1946-),男,教授,博士生导师,主要从事高速信号处理与实时信号处理、通信与信息系统中的信号处理、 DSP技术方面的研究。

对 $f(i, j)$ 和 $h(i, j)$ 逐元扫描一遍作为一次迭代。迭代从一个高温开始, 逐步下降到零。在扰动中同时考虑正性限制和支持域限制。

这种算法是基于均匀分布的模拟退火图像盲复原算法。经过计算机仿真, 该算法可以恢复原始图像, 但在极小点附近的搜索效果不好, 对初值较敏感, 初值鲁棒性不理想, 并且收敛到最优解, 所需时间很长。模拟退火算法的搜索性能主要是由状态产生函数(依赖于随机扰动量)、接受函数、退温函数、抽样稳定准则和算法终止准则来决定。而状态产生函数是决定了算法在解空间中的移动方式, 它是优化过程克服能量障碍并趋于全局极小的关键因素。结合模拟退火算法的退温历程, 算法的搜索行为在高温时体现为遍历性很强的全空间粗搜索, 在低温时体现为局部趋化性的细搜索。通过上述分析, 显然扰动量服从均匀分布的状态产生函数, 会影响到算法的效率, 因为在整个降温过程中, 均匀分布对状态扰动的概率均等, 这不符合高温时粗搜索, 低温时细搜索的退温历程。因此, 寻找一种能较好的符合该退温历程的随机扰动量将有助于算法性能的提高, 而Cauchy分布就是产生这一随机扰动量的一种较理想的分布。

1.1 均匀分布与Cauchy分布的比较

均匀分布与Cauchy分布的概率密度函数分别定义为以下两种:

(1) 均匀分布时, 在区间 $[a, b]$ 上均匀分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 1/(b-a) & x \in [a, b] \\ 0 & x \notin [a, b] \end{cases} \quad (2)$$

(2) Cauchy分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{a}{a^2 + x^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (3)$$

以原点为中心的均匀分布和Cauchy分布函数曲线如图1所示。从图中看出^[3], 均匀分布产生一定区域内的任意幅度的扰动的概率均等; 而Cauchy分布在原点处有峰值, 两端呈长扁平状, 趋于零的速度很慢。因此, 基于柯西分布的邻域函数既能产生小扰动也能产生大扰动。在Cauchy分布中, a 为尺度参数, 随着 a 的不同, Cauchy分布的概率密度函数如图2所示。从图中可以看出, 随着 a 的增大, 概率密度函数在原点的峰值逐渐减少, 而两端趋于零的速度越来越慢, 这说明, 尺度参数 a 越大, 产生大步长移动的概率加大, 有利于大范围粗搜索; a 越小, 产生局部小扰动的概率加大, 有利于局部细搜索。因此, 可以在模拟退火算法退温历程的初期, 采用较大尺度参数的Cauchy随机扰动量进行粗搜索, 在退温历程的后期, 采用较小尺度参数的Cauchy随机扰动量进行细搜索。这样可以改进搜索效率, 提高搜索到最优解的速度。

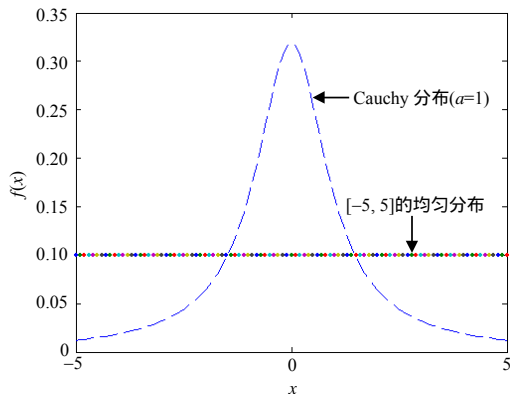


图1 Cauchy与均匀分布概率密度函数

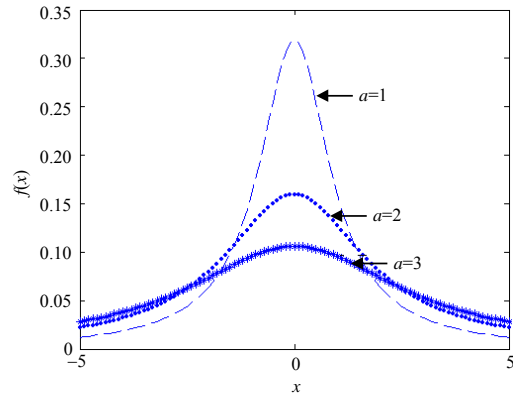


图2 不同尺度参数下Cauchy分布概率密度函数

1.2 改进的模拟退火图像盲复原算法

在图像盲复原算法中, 将复原算法转化为一个函数优化问题, 即寻找 \hat{f}, \hat{h} , 使得代价函数式(4)最小。此时假设 $f(i, j)$ 和 $h(i, j)$ 具有有限支撑域且都为正值。在改进算法中, 采用Cauchy分布尺度参数自适应修正方案^[3]: $a_{n_c} = 2 \times (0.99)^{n_c}$, 其中, n_c 为模拟退火算法中的循环次数。随着 n_c 的增大, a_{n_c} 逐渐减少, 使得在退温初期进行粗搜索, 避免进入局部极小, 在退温后期进行细搜索, 以快速获得全局最优值。

$$Q(f, h) = \frac{\sum_{\forall(i, j)} [f(i, j) * h(i, j) - g(i, j)]^2}{\sum_{\forall(i, j)} [g(i, j)]^2} \quad (4)$$

设 $\hat{f}(i, j)$ 为估计图像, $\hat{h}(i, j)$ 为点扩展函数(PSF)的估计值, maxcycle为算法循环的最大次数, maxscan为每次循环中扫描的最大次数, T_n 为温度参数。那么, 改进的模拟退火图像盲复原算法的基本步骤如下:

1) 初始化: 随机初始化 $\hat{f}(i, j)$ 和 $\hat{h}(i, j)$ 为 \hat{f}_0, \hat{h}_0 , $T_0 = Q(\hat{f}_0, \hat{h}_0) / 10$, maxcycle=300, maxscan=300, $n_c=1$, $n_s=1$;

2) 令 $n_c=1, 2, \dots, \text{maxcycle}$, 有 $T_{n_c} = 0.8T_{n_c-1}$, 扰动幅度 $\alpha_{n_c} = 100\sqrt{T_{n_c}}$;

3) 让 $\hat{f}(i, j) = \beta \hat{f}(i, j)$, $\hat{h}(i, j) = (1/\beta) \hat{h}(i, j)$, β 是使 \hat{f}, \hat{h} 扰动的均方根固定的参数, 以使 $\hat{f}(i, j) * \hat{h}(i, j)$ 的能量为常数;

4) 令 $n_s=1, 2, \dots, \text{maxscan}$, 在 $f(i, j)$ 和 $h(i, j)$ 的支撑域内, 对每一像素 (i, j) 重复以下步骤:

(1) 状态产生函数:
$$\begin{cases} \hat{f}_p(i, j) = \hat{f}(i, j) + \alpha\xi \\ \hat{h}_p(i, j) = \hat{h}(i, j) + \alpha\xi \end{cases}$$
 其中, ξ 是服从Cauchy分布的伪随机数(随机扰动量), 并且

其尺度参数为: $a_{n_c} = 2 \times (0.99)^{n_c}$;

(2) 状态接受函数: 令 $\Delta Q = Q(\hat{f}_p, \hat{h}_p) - Q(\hat{f}, \hat{h})$, 如果 $\Delta Q \leq 0$ 则以概率 1 接受新的状态 \hat{f}_p, \hat{h}_p ; 如果 $\Delta Q > 0$, 则以概率 $p = \exp(-\Delta Q/T)$ 接受扰动。具体为: 设 γ 为服从 $[0, 1]$ 的均匀分布的伪随机数, 当 $p > \gamma$ 时接受新的状态 \hat{f}_p, \hat{h}_p , 否则就不接受;

5) 反复运行步骤4), 直到满足抽样稳定准则为止;

6) 返回步骤2), 重复运行上述过程, 直到满足算法终止准则为止。

2 计算机仿真与结果分析

以下对McCallum的模拟退火盲复原算法和改进的模拟退火图像盲复原算法进行了仿真分析。仿真环境为: CPU:AMD XP 2200+, RAM:512M, Matlab 6.1。对图3a和3b所示的 9×8 大小以及图4a和4b所示的大小分别为 10×11 和 9×10 的这两个例子做了仿真, 图3c和图4c分别为降晰图像。对McCallum的算法与改进的算法分别随机进行了20次运算。从仿真结果中可以看出: 当 $\lg(Q) < 10^{-3}$ 时, 复原的效果特别理想, 如图3f、3g和图4f、4g。因此, 当 $\lg(Q) < 10^{-3}$ 时, 认为达到了最优解。经实验数据统计(见表1), 在随机运行20次结果中, McCallum的算法所得 $\lg(Q)$ 大多在 $10^{-2.3}$ 附近波动(如图4d、4e), 而改进算法大多在 10^{-3} 附近波动(如图3d、3e), 因此, 改进算法的整体复原效果要好很多。另一方面, 对于随机的初始值, 文献[1]的算法达到最优解 ($\lg(Q) < 10^{-3}$) 的概率为 $(2/20) \times 100\% = 10\%$, 达到最优解所需平均时间为480.992 0 s, 而改进的算法达到最优解的概率为 $(10/20) \times 100\% = 50\%$, 达到最优解所需平均时间为248.397 0 s。综上所述, 改进的算法比文献[1]的算法效率要高, 对初值的鲁棒性也要优于文献[1]的算法, 并且提高了收敛到最优解的速度。

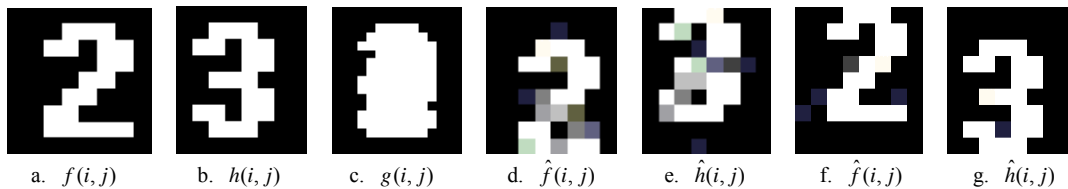


图3 图像复原效果图(图3d和3e为 $\lg(Q)=10^{-3}$ 的复原图像; 图3f和3g为 $\lg(Q)=10^{-4}$ 的复原图像)

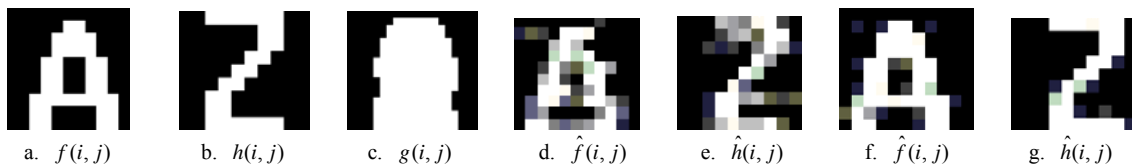


图4 图像复原效果图(图4d和4e为 $\lg(Q)=10^{-2.3}$ 的复原图像; 图4f和4g为 $\lg(Q)=10^{-3.7}$ 的复原图像)

(下转第787页)

3 结 论

通过微尖锥发射体表面温度的自治求解, 定量得出了锥体尖端表面温度与构成尖锥的物质的物理参量与结构参量的关系, 通过分析可知: 由Nottingham效应和焦耳热产生的温度在通常发射电流情况下, 并不会达到钼的熔点温度而引起微尖锥发射体的失效; 热传导是锥体散热的降温的主要方式。因此, 在结构参量方面, 锥体的截面积大小(半锥角的大小)对尖端温度的分布起着至关重要的作用; 物理参量方面, 热传导率起至关重要的作用。一些在微细加工中不规则的微尖, 若形成微小的突起, 场发射将集中于这些突起, 并由于微突起的热传导面积小, 半锥角小而产生较大的发射电流使锥体融化。此外, 在较大的发射电流情况下, 离子轰击对锥体的溅射腐蚀将影响锥体的高度和半锥角, 同时也将引起锥体表面功函数的改变, 这将极大降低场发射电流密度。

参 考 文 献

- [1] Spindt C A, Brodie I, Humphrey L, et al. Physical properties of thin-film field field-emission cathodes with molybdenum cones[J]. J. Appl. Phys. , 1976, 47: 5248.
- [2] Brodie I. Temperature of a strongly field emitting surface[J]. Int. J. Electron, 1965, 18: 223.
- [3] Robert B Marcus K, Chin K, et al. Simulation and design of field emitters[J]. IEEE Transactons on Electron Devices, 1990, 37(6): 1545.
- [4] Ancona M G Thermomechanical analysis of failure of metal field emitters[J]. J. Vac.Sci.Technol., 1995, B13(6): 2206.
- [5] Nottingham W B. On the thermodynamic interpretation of certain thermionic and thermoelectric phenomena[J]. Phys. Rev., 1941, (59): 889-896
- [6] Murphy E L, Good R H. Thermionic emission, field emission, and the transition region[J]. Phys. Rev., 1956, 102(6): 1464.
- [7] Brodie I. Temperature of a strongly feid emitting surface[J]. J. Electron, 1965, (18): 223.
- [8] Yu Z X, Wu S S, Xu N S. Theoretical study of thermal instability of mo tips with an without diamond coatings[J]. J. Vac. Sci. Technol., 1999, B17(2): 562.

编 辑 孙晓丹

(上接第769页)

表1 McCallum的算法与改进的算法的性能对比

算法类型	最佳优化值	平均优化值	最差优化值	达到最优	达到最优值
	$\lg(Q)$	$E\{\lg(Q)\}$	$\lg(Q)$	值的概率/(%)	所需平均时间/s
McCallum的算法	$10^{-3.7}$	$10^{-2.3}$	$10^{-1.7}$	10	480.992 0
改进的算法	10^{-4}	10^{-3}	$10^{-2.5}$	50	248.397 0

3 结 束 语

模拟退火算法是一种常用的概率性全局优化算法, McCallum将它用于图像的盲解卷积, 在McCallum的模拟退火算法中, 状态产生函数中的随机扰动量服从均匀分布。本文通过分析均匀分布与Cauchy分布的分布机制, 对该算法进行了改进, 提出了一种基于Cauchy分布随机扰动量模拟退火图像盲复原算法, 最后通过计算机仿真, 验证了改进算法对初值的鲁棒性、复原的效果、收敛到最优解的速度都要优于文献[1]的方法。

参 考 文 献

- [1] McCallum B C. Blind deconvolution by simulated annealing[J]. Optics Communications, 1990, 75(3): 101-105.
- [2] Kundur D, Hatzinakos D. Blind image deconvolution[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(3): 43-64.
- [3] 王 凌, 郑大钟. 基于Cauchy和Gaussian分布状态发生器的模拟退火算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(9): 109-112.
- [4] Yan Lei-po, Wang Li-po. Image restoration using chaotic simulated annealing[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003, 4: 3060-3064.
- [5] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

编 辑 刘文珍