

基于模拟退火算法的红外图像自适应对比度增强

张长江 付梦印

金梅

(北京理工大学信息科学技术学院2系, 北京 100081)

(大庆石油学院电气信息工程学院, 黑龙江大庆 163318)

摘要 基于模拟退火算法和非完全 Beta 函数, 提出了一种自适应红外图像对比度增强方法。首先基于输入红外图像的灰度直方图给出一种有效的判据。对输入红外图像先利用所提出的判据判断图像的对比度类型, 然后利用这个判据来确定灰度变换参数的搜索空间, 进一步指导模拟退火算法的搜索方向和初值的选取。利用模拟退火算法在上述确定的灰度变换参数空间中搜索最佳的灰度变换参数, 从而获得一条最佳的灰度变换曲线, 实现对图像进行全局增强处理。实验结果表明, 该算法在有效地提高红外图像整体对比度的同时, 很好地保留了图像中的细节部分信息。算法在视觉质量上优于传统的直方图均衡法、反锐化掩膜法。

关键词 红外 模拟退火算法 非完全 Beta 函数 对比度增强

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)04-0391-05

Adaptive Contrast Enhancement of Infrared Image Based on Simulated Annealing Algorithm

ZHANG Chang-jiang, FU Meng-yin

(Dept. 2, school of information and science technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

JIN Mei

(School of electrics and information engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing Helongjiang 163318)

Abstract A new kind of infrared image adaptive contrast enhancement approach based on simulated annealing algorithm and incomplete Beta function is given. Firstly, an efficient criterion is given based on gray level histogram of input image. Input image contrast type is determined by the criterion mentioned above, and then the criterion is used to determine the searching space of gray transformation parameters and guide the search orientation and the selection of initial values of simulated annealing algorithm. The optimal gray transformation parameters are obtained in the parameter space with the simulated annealing algorithm. Thus an optimal gray transformation curve is obtained and global contrast enhancement is done to the input image based on the optimal gray transformation curve. The performance of the new approach is analyzed. Lots of experiments have been done in order to validate the efficiency of the new approach. Based on the experimental result, the new approach can enhance the global contrast of the infrared image effectively while it also keeps the details of the target in the infrared image well. In visual quality, the new approach is better than traditional histogram equalization method and un-sharp mask method.

Keywords IR, simulated annealing algorithm, incomplete beta function, contrast enhancement

1 引言

目前红外图像已经广泛应用于军事和民用领域中, 但由于红外成像系统成像器件的灵敏度、分辨率和噪声特性以及系统的扫描机制, 致使红外图像存在成像比较模糊, 噪声较大等缺点, 因此对红外图像

进行有必要增强处理, 这也是进行分割和识别的前提和基础。为此, 近年来国内外学者提出了一些有效的新方法和理论^[1~5]。

对比度增强的常用方法有直方图均衡法、直方图规定化法和灰度变换法及反锐化掩膜法等。直方图均衡法是对整个图像的所有像素都进行增强, 具体增强效果不容易控制, 不能突出图像中的目标。直

方图规定化法虽然理论上能够有选择地增强图像中的特定信息,但是在实际应用中选择一种最佳的直方图却是很困难的。而且现在提出的图像增强方法,多数方法的智能性和自适应性都较差,需要较多的人为介入,从而大大限制了其应用范围。基于此,本文采用灰度变换,基于模拟退火算法提出一种自适应的红外图像增强方法。

2 基于直方图的图像分类

基于灰度直方图将输入红外图像按视觉效果分为 7 类:偏暗、中偏暗、中稍偏暗、中稍偏亮、中偏亮、偏亮和灰度分布比较均匀。

设输入图像的灰度分布为 0~255 个灰度级,按照上述分类标准,如图 1 所示将整个灰度空间划分为 6 个子空间。

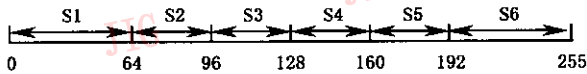
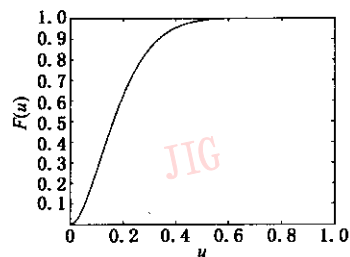


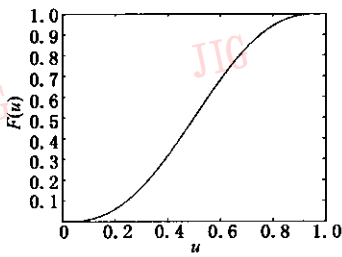
图 1 基于灰度直方图的图像分类示意图

令 $S_i(i=1,2,\cdots,6)$ 表示分布于第 i 个子空间的像素个数。设 $S=\max_{i=1}^6 S_i$,为了以下叙述方便,令 $S_1=\sum_{k=2}^6 S_k, S_2=\sum_{k=2}^5 S_k, S_3=\sum_{k=1}^5 S_k, S_4=S_1+S_6, S_5=S_2+S_3, S_6=S_4+S_5$,则按照如下标准对输入图像进行分类:

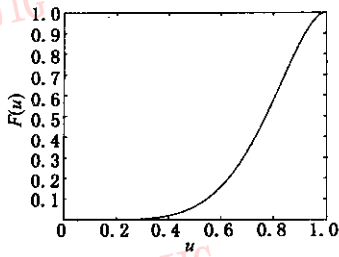
if $S=S_1 \ \& \ S_1>S_1$
图像偏暗;
esle if $S_2>S_4 \ \& \ S_5>S_6 \ \& \ S_5>S_1 \ \& \ S_5>S_6 \ \& \ S_2>S_3$
图像中偏暗;
esle if $S_2>S_4 \ \& \ S_5>S_6 \ \& \ S_5>S_1 \ \& \ S_5>S_6 \ \& \ S_2<S_3$
图像中稍偏暗;
esle if $S_2>S_4 \ \& \ S_5<S_6 \ \& \ S_1<S_6 \ \& \ S_6<S_6 \ \& \ S_4>S_5$
图像中稍偏亮;



(a) $\alpha=2, \beta=9$



(b) $\alpha=3, \beta=3$



(c) $\alpha=6, \beta=3$

图 2 3 种典型的灰度变换函数

esle if $S_2>S_4 \ \& \ S_5<S_6 \ \& \ S_1<S_6 \ \& \ S_6<S_6 \ \& \ S_4<S_5$
图像中偏亮;
esle if $S=S_6 \ \& \ S_6>S_3$
图像偏亮;
esle
图像灰度分布比较均匀;
end

其中,符号 $\&$ 表示“与”逻辑,上述伪代码详细描述了利用灰度直方图对输入图像进行分类的过程,为后续图像的增强处理奠定基础。

3 基于模拟退火算法的对比度增强

3.1 灰度变换曲线的自动拟合

Tubbs 利用归一化的非完全 Beta 函数来实现几种典型的灰度变换曲线的自动拟合^[6]。归一化的非完全 Beta 函数 $F(u)$ 定义为

$$F(u) = B^{-1}(\alpha, \beta) \times \int_0^u t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt \quad (1)$$
$$0 < \alpha, \beta < 10$$

其中, $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt$ 为 Beta 函数。不同的 α 和 β 能够拟合各类的灰度变换曲线。Tubbs 采用类似穷举法或人工干预的方法来确定最佳的 α 和 β 值,但这样处理不具智能性,基于此,拟采用对初始值不敏感的模拟退火算法来自动的搜索最优的 α 和 β 值,从而获得良好的增强效果。

下面来讨论一下针对不同类型输入图像的 α 和 β 取值范围的选取情况。由式(1)可知, α 和 β 的取值控制变换曲线的形状,当 $\alpha<\beta$ 时,经过变换后对较暗的区域进行拉伸;当 $\alpha=\beta$ 时,变换曲线是对称的,对中间区域进行拉伸,对两端进行压缩;当 $\alpha>\beta$ 时,经过变换后对较亮的区域进行拉伸。几种典型的灰度变换曲线如图 2 所示。

结合第 2 节提出的分类标准和实验测试,对各类输入图像, α 和 β 的取值范围按照如表 1 中的标准确定比较合适。按照表 1 中给出的参数范围确定模拟退火算法的搜索空间和设置初始点的值,与 Tubbs 原来的参数取值范围相比大大缩小了搜索空间,并能按照不同类型的图像自适应地确定参数的取值范围,从而能够避免原来算法的大量无用的盲目搜索过程,促使算法快速收敛。

表 1 参数 α 和 β 的取值范围

参数取值	偏暗	中偏暗	中稍偏暗	中稍偏亮	中偏亮	偏亮
α	[0,2]	[0,2]	[0,2]	[2,4]	[2,6]	[7,9]
β	[7,9]	[2,6]	[2,4]	[0,2]	[0,2]	[0,2]

3.2 图像质量的评价标准

设 $f(x,y)$ 表示在点 (x,y) 处的原始输入红外图像的灰度值, $f'(x,y)$ 为其处理后的图像灰度值。在处理前首先进行归一化处理

$$g_1(x,y)=[f(x,y)-L_{\min}]/[L_{\max}-L_{\min}] \quad (2)$$

其中, $L_{\min}$ 和 $L_{\max}$ 分别为原始输入红外图像的最小和最大灰度值。定义非线性变换函数为 $F(u)$, $0 < u < 1$, 则有

$$g'_1(x,y) = F[g_1(x,y)]$$

其中, $0 \leq g'_1(x,y) \leq 1$ 。令 $F(u)$ 如式(1), 则有

$$f'(x,y) = (L_{\max} - L_{\min})g'_1(x,y) + L_{\min} \quad (3)$$

以文献[7]中提出的评价图像质量的测量函数为标准来确定模拟退火算法的目标函数

$$SAobj[f'(x,y)] = \left| \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f'(x,y) \right|^2 - \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f'^2(x,y) \quad (4)$$

其中, M 和 N 分别为图像的宽和高, 式(4)的值越小, 则图像的灰度分布越均匀, 图像的对比度越好, 视觉质量也就越好。

3.3 基于模拟退火算法的灰度变换参数求解

模拟退火算法是 1982 年由 Kirkpatrick 将固体退火思想引入组合优化领域而提出的[8]。它源于对固体退火过程的模拟, 采用 Metropolis 接受准则, 并用一组称为冷却进度表的参数来控制算法的进程, 使算法在多项式时间里给出一个近似最优解。

国内外众多学者针对不同的应用提出了各种各样的模拟退火算法, 但是这些算法都有各自的针对性, 为了实现本文中图像增强的目的, 本文主要是基于 William 提出的用于连续变量优化的模拟退火算法[9], 这种算法本质上是一种自适应地沿着坐标方

向迭代随机搜索过程, 在一个概率准则的控制下执行“爬山”过程, 这样能够避免陷入局部最优点。但是此算法要经过较多次的函数评价过程才能收敛到全局最优值, 而且收敛过程还与初始点的选取有关, 这样如果直接应用于图像增强势必会造成计算量大, 算法鲁棒性较差。基于此, 基于第 2 节提出的图像分类方法来指导模拟退火算法的搜索方向和初始点的选取, 缩小算法的搜索空间和计算量, 避免大量无用的盲目随机搜索过程, 从而加快算法的收敛速度, 并增强算法的对初值的鲁棒性。

下面再来讨论一下利用模拟退火算法求解最佳变换参数 α 和 β 的过程。设 $x=(\alpha,\beta)$, $F(x)$ 是要被最小化的函数, 对应于式(4), 其中 $a_i < \alpha, \beta < b_i (i=1,2)$, a_i 和 $b_i (i=1,2)$ 的取值按照表 1 确定。

为了以下叙述方便, 现在将算法中要用到的参数作一说明:

- T_0 —初始温度;
- N_s —步长偏差测试的函数评价次数;
- N_T —降温测试的函数评价次数;
- r_T —降温衰减系数;
- c —用于控制步长向量偏差的参数;
- ϵ —终止控制精度;

经过实验测试, 上述各个参数的取值分别为如下时, 能够获得满意的优化结果

$$N_s=20; N_T=100; c_i=2(i=1,2); T_0=5; r_T=0.95$$

模拟退火算法的具体步骤如下:

- (1) 初始化参数 x, T_0, N_T, N_s, r_T, c ;
- (2) 根据 x 随机产生一个点 x' , 即 $x' = x_i + r v_{m_h}$, 其中 r 是 $[-1,1]$ 之间的一个随机数;
- (3) 计算 $F' = F(x')$,

如果 $F' \leq F_i$, 那么就接受新点;

如果 $F' < F_{\text{opt}}$, 那么 $x_{\text{opt}} = x'$;

否则如果 $F' > F_i$, 那么按照如下的 Metropolis 概率准则接受和拒绝新点:

$$p = \exp\left(\frac{F_i - F'}{T_k}\right)$$

产生一个 $[0,1]$ 之间的随机数 p' , 如果 $p' < p$, 则接受新点, 否则拒绝新点;

(4) 如果步长偏差测试的函数评价次数没有达到 N_s , 那么返回第 2 步;

否则按照下式更新步长向量 v_m , 对于每个方向 u , 新的步长向量为 v'_u :

$$v'_u = v_{m_u} \left(1 + c_u \frac{n_u/N_s - 0.6}{0.4} \right) \quad \text{如果 } n_u > 0.6N_s$$
$$v'_u = \frac{v_{m_u}}{1 + c_u \frac{0.4 - n_u/N_s}{0.4}} \quad \text{如果 } n_u < 0.4N_s$$
$$v'_u = v_{m_u} \quad \text{其他}$$

上述更新方法主要目的是为了保持新点被接受的概率在 50%左右,参数 c_u 控制步长偏差;

(5) 如果已经达到降温测试的函数评价次数 N_T ,则返回第 2 步;

否则降温: $T_{k+1} = r_T \cdot T_k$;

(6) 如果 $|F_k^* - F_{k-u}^*| \leq \epsilon$ 且 $(F_k^* - F_{opt}) \leq \epsilon$,那么停止搜索;

否则返回第 2 步。

基于上述模拟退火算法并结合式(4),就能够确定最佳的参数 α 和 β 的值,从而获得一条最佳的变换曲线,以达到有效的增强红外图像的对比度的目的。至于上述算法中涉及到非完全 Beta 函数的计算问题,现在有许多现成的软件包可以用来进行计算。

3.4 算法步骤

综上所述,利用基于模拟退火的红外图像对比度增强算法描述如下:

- (1) 判断输入红外图像的类型;
- (2) 对输入图像进行归一化处理;
- (3) 确定参数 α 和 β 的取值范围;
- (4) 利用模拟退火算法求解最佳的 α 和 β 值;

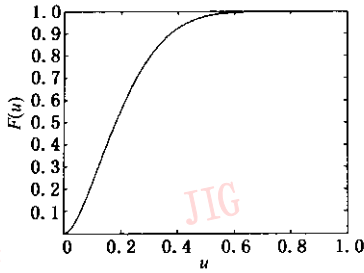


图 3 灰度变换曲线

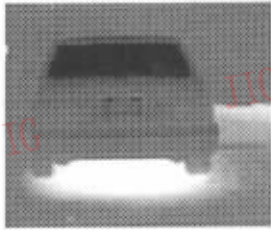


图 4 原始图像

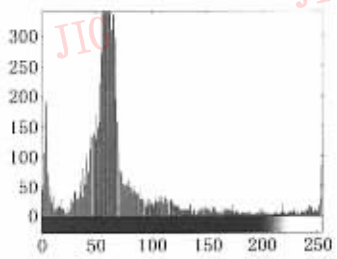


图 5 原图像直方图



(a) HE 增强



(b) USM 增强



(c) SA 增强

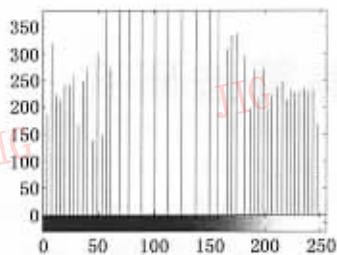
图 6 利用 3 种增强方法增强的结果

(5) 利用所求得的 α 和 β 值构造灰度变换曲线,对输入图像进行增强;

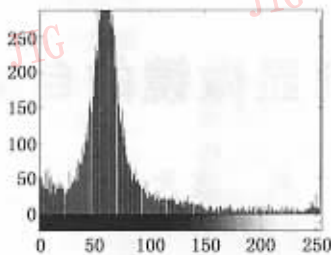
(6) 对增强后的图像进行反归一化,得到最终的增强图像。

4 实验结果

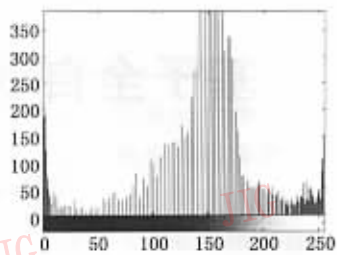
实验红外图像大小为 148×96 ,分别采用传统的直方图均衡法、反锐化掩膜法和本文的基于模拟退火方法等 3 种方法对红外图像进行对比度增强。图 3 表示利用模拟退火算法进行全局增强时所得到的最佳变换曲线,其中 $\alpha = 1.9334, \beta = 7.6355$,这种变换曲线将输入图像整体对比度大大提高。结合输入图像(图 4)及其灰度直方图(图 5)可知,输入图像偏暗,这与实验中利用所提出的标准判断输入图像类型为“偏暗”恰好吻合。图 6,图 7 中 HE 表示直方图均衡,USM 表示反锐化掩膜,SA 表示模拟退火。由以上的实验结果可以看出,直方图均衡虽然整体对比度较好,但是图像中目标的细节部分信息却很模糊,如轿车后部的车牌照等。反锐化掩膜方法增强虽然保持了图像中的细节部分信息,但是增强后图像的整体对比度较差。综合考虑本文提出的方法效果明显是最好的,增强后图像灰度分布均匀,整体对比度良好,图像中的轿车轮廓清晰,细节信息被很好的保留,如车后面的牌照等,不失为一种良好的红外图像对比度增强方法。



(a) HE 增强后直方图



(b) USM 增强后直方图



(c) SA 增强后直方图

图7 增强前后的图像直方图

5 结 论

本文基于模拟退火算法,结合非完全 Beta 变换算子对红外图像进行对比度增强。实验结果表明,该方法能够根据不同类型的输入图像自适应地选取参数空间,不但提高了红外图像的整体对比度,而且很好地保留了图像中目标的细节部分信息,大大改善了红外图像的视觉质量。算法在视觉质量上优于传统的直方图均衡法和反锐化掩膜法,有一定的工程实用价值。

实验中发现,本文提出的对比度增强方法,不但能够自适应地增强各种类型的红外图像的对比度,而且稍作修改后对其他类型的图像,如可见光图像等也有明显的增强效果。该方法虽然能够有效地增强红外图像的对比度,但是其仍旧是一种全局对比度增强方法,因此进一步的工作是考虑在增强整体对比度的同时增强图像中目标的细节信息。

参 考 文 献

- 殷德奎,张保民,柏连发. 红外图像的二维灰度变换增强方法[J]. 红外技术,1999,21(3):25~29.
- 徐军,梁昌洪,张建奇. 一种红外图像增强的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000,27(5):546~549.
- 周激流,吕航. 一种基于新型遗传算法的图像自适应增强算法的研究[J]. 计算机学报,2001,24(9):959~964.
- Yeong-Taeg Kim. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997,43(1):1~8.
- Andrew F Laine, Xuli Zong. A multiscale sub-octave wavelet transform for de-noising and enhancement[J]. Proceedings of SPIE, 1996,2825:238~249.

- Tubbs J D. A note on parametric image enhancement [J]. Pattern Recognition, 1997, 36(6):617~621.
- 康立山,谢云,尤矢勇,等. 非数值并行算法—模拟退火算法[M]. 北京:科学出版社,2000:22~23.
- William L Goffe, Gary D Ferrier, John Rogers. Global optimization of statistical functions with simulated annealing[J]. Journal of Econometrics, 1994,60:65~99.
- Azriel Rosenfield, Avinash C K. Digital Picture Processing [M]. New York, Academic Press, 1982:154~167.



张长江 1974 年生,1998 年于大庆石油学院自动控制系统控制理论与控制工程专业获工学学士学位,2001 年 3 月于该校获工学硕士学位,现为北京理工大学信息科学技术学院自动控制系统在读博士研究生。主要研究方向为复杂背景下的红外目标识别、小波分析、神经网络、优化理论及其应用。



付梦印 1964 年生,工学博士,北京理工大学信息科学技术学院自动控制系统,教授,博士生导师,现任北京理工大学信息科学技术学院常务副院长。主要研究方向为导航、制导与控制。曾获国防科工委科技进步一等奖 1 项,兵器工业部科技进步一等奖 2 项。



金梅 1977 年生,1999 年于天津理工大学自动控制系统信号检测专业获工学学士学位,现为大庆石油学院电气信息工程学院在读硕士研究生。主要研究方向为数字信号处理、系统仿真及其应用。