

红外图像的变分增强算法

王超¹, 叶中付^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 电子工程与信息科学系信号统计处理研究室, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院自动化研究所 模式识别国家重点实验室, 北京 100080)

摘要:提出了一种基于全变差和对比度的红外图像变分增强方法. 针对红外图像噪声较大的特点, 在现有变分增强算法的基础上, 构造目标梯度场时, 事先考虑了对噪声的限幅, 防止不必要的噪声放大. 另外, 构造目标函数时加入了图像的全变差(TV)约束, 使得噪声进一步得到抑制. 直方图类算法会对灰度邻近、分布较少的灰度阶进行合并, 从而丢失一些有用细节. 本算法不会出现直方图算法的类似问题. 实验表明本算法相对于常见的直方图处理算法, 可以更有效地增强红外图像.

关键词:红外图像; 图像增强; 变分; 全变差; 直方图

中图分类号: TP391 文献标识码: A

VARIATIONAL ENHANCEMENT FOR INFRARED IMAGES

WANG Chao¹, YE Zhong-Fu^{1,2}

(1. Institute of Statistical Signal Processing, Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A variational enhancement method for infrared images was proposed based on total variation (TV) and contrast. Considering that the infrared images generally are much noisy, the proposed method restricts the noise to compute the target gradient based on the existing variational enhancement scheme. In addition, the object function includes an extra term representing total variations, which gives a further suppression to the noise. The histogram-based algorithms are likely to merge the gray levels which are similar in intensity and have low distribution, thus some useful details will be decreased. The proposed variational method does not have such problems as histogram method, and is more effective to enhance infrared images.

Key words: infrared image; image enhancement; variational method; total variation (TV); histogram

引言

虽然传感器技术发展很快, 红外成像技术因其反映事物特征的特殊性(如温度等)被越来越多地应用. 但是, 红外成像观察到的事物常常灰度分布过于集中, 对比度低并伴随有大量的散粒噪声, 对于景物中的细节不易观察. 故而红外图像的增强成为近年来研究的热点.

直方图均衡(Histogram Equalization, HE)是对这一类问题最为传统的处理方法, 它是为了解决图像的灰度分布集中, 对比度差的问题所提出的一种算法. 它使得图像的直方图达到“最平坦”, 但是却常常使一些灰度相近、分布较少的灰度值的细节信

息被抹去; 平台直方图均衡(Plateau histogram Equalization, PHE)^[1,2]是对HE算法的改进, 该算法给细节提升留出了空间, 但是很难事先确定其上限平台参数; 二分直方图均衡(Bi-Histogram Equalization, BHE)^[3]将图像的直方图用均值分为两部分, 对两部分分别做均衡, 从而在一定程度上保持了图像的整体灰度, 适于在电视等家电产品中使用; 双向直方图均衡(Double Histogram Equalization, DHE)^[4]是在HE之后再一次对直方图的灰度阶做一次等间隔划分. 这些直方图处理的改进方法确实可以在一定程度上提高图像的视觉效果, 但却无法克服直方图均衡可能丢失直方图分布较低的某些细节的弱点. 基于小波变换的增强方法近年来引起了研究人员的

关注^[5],由于对小波系数做非线性处理时易产生振铃效应,因而使其应用受到了限制。

本文从已有的普通图像增强的变分方法^[6]出发,针对红外图像噪声大的特点,在构造增强目标梯度场时,先对噪声做限幅,防止不必要的噪声放大。由于图像增强主要是放大微弱有用的信息,设计了一个随梯度信息强度增加而递减的增强系数,在增强整体对比度的同时,使得较小的对比度具有较强的增强效果。然后仍然是针对算法中可能的噪声问题,在构造目标函数时,加入了图像的 TV 约束,也就是在图像分段光滑性约束下,使得目标梯度场得以实现。

本文首先介绍针对红外图像的变分增强原理和离散化实现方法;然后通过与现有的 HE、BHE、DHE 算法的实验结果比较来说明这种新颖增强方法的有效性;最后对本算法做简要的总结。

1 红外图像的变分增强

虽然人类的视觉机理还不完全清楚,但根据已有的初步探索,图像的局部对比度在视觉中扮演着很重要的角色。对比度大的地方,视觉效果一般就比较好,细节比较清楚。

1.1 现有变分增强模型^[6]

一幅灰度图像 $I_0(x, y)$, $((x, y) \in \Omega = [0, N-1] \times [0, M-1])$, 则点 $p \in \Omega$ 处的对比度可以定义为

$$V_{I_0}(p) = \left(\frac{\partial I_0}{\partial x}, \frac{\partial I_0}{\partial y} \right)_p \quad (1)$$

也就是图像在 p 点的梯度 $\nabla I_0(p)$ 。这样,图像在每一点的对比度构成了一个二维的矢量场,对比度场,也即梯度场,它反映了图像中每点附近的灰度变化情况,梯度大小表示了变化的快慢,梯度的方向表示了变化的方向。

若另一幅图像 I' 的对比度场 $V_{I'}(p)$ 与 $V_{I_0}(p)$ 在每一点上具有同样的方向,但是在大小上,前者均大于后者,则图像 I' 应该比 I_0 更加清楚,可以看成是 I_0 的增强(对比度拉伸)。因此,对图像 I_0 的一种增强可以描述为寻找 I' , 使

$$V_{I'}(p) = k \cdot V_{I_0}(p) = k \cdot \nabla I_0(p), \forall p \in \Omega \quad (2)$$

这里 $V_{I'}(p)$ 就是增强后的目标对比度场, k 表示拉伸的程度,一般 $k > 1$ 。

1.2 全变差-对比度增强模型

在引言中已经提到,对于红外图像来说,其图像

质量较差,主要是由于整体对比度低,并且噪声较为明显。1.1 节中的系数 $k > 1$ 在提高对比度的同时,将噪声放大了。故而对于红外图像,需要做一些特殊的处理。

仿照[7,8]对于红外序列图像处理中的空域噪声限幅策略,认为幅度小于某一门限的梯度是由于噪声引起的^①。这样对于 I_0 增强后的图像期望具有如下形式的梯度场

$$W = k \cdot T_\varepsilon(\nabla I_0) = \begin{cases} k \cdot \nabla I_0, & |\nabla I_0| > \varepsilon \\ 0, & |\nabla I_0| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

其中 k 是放大系数。考虑到实际图像增强中,对于原本梯度大的地方,视觉效果本身就比较清楚,不需要增强,而对于原图像梯度小的地方,才是真正需要强调的信息,故而对于上式中的 k , 用一个随着梯度增大而衰减的关系来描述,但是不能小于 1

$$k(p) = 1 + \lambda_1 e^{-|\nabla I_0|/\lambda_2} \quad (4)$$

其中 $\lambda_1 > 0$ 反映了对比度的最大放大倍数,而 $\lambda_2 > 0$ 反映了放大系数随梯度增大的衰减速度。采用这样一个衰减的增强系数 k 可以使得高对比度地方增强较少,增强图像结果总体比较柔和,视觉效果不至于太锐化,但是对于一些有用的但是原本不易观察的细节却得到较好的增强。

通过这种方法构造出来的 W 保持了大的对比度信息,放大了微弱的有用信息,但同时,将一些超过阈值 ε 的噪声梯度也进行了放大,故而需要做一些其他修饰。

全变差模型(TV)^[9]对于描述结构特征的图像非常合适,作为变分图像处理常用的能量函数之一^[10],它允许阶跃信号的存在(对应于边缘),同时描述了图像的整体不光滑性。

$$TV(u) = \int_{\Omega} |\nabla u| \, dx dy \quad (5)$$

故而,本文综合考虑图像光滑性的保持和图像有用信息的放大。在图像梯度场与 W 接近的条件下,使得图像的 TV 能量最小,即寻找增强图像 g , 使得如下泛函最小

$$S(g) = \alpha \int_{\Omega} |\nabla g| \, dx dy + \beta \int_{\Omega} |\nabla g - W|^2 \, dx dy \quad (6)$$

其中正参数 α, β 表示了对两项考虑的比重。因为前面已经有预处理对目标梯度场 W 中的噪声做过一

^① 这是一种简单的近似,也可将现有一些判断噪声的算法应用进来,本文仅使用[7,8]里这种简单的方法进行初步限幅。

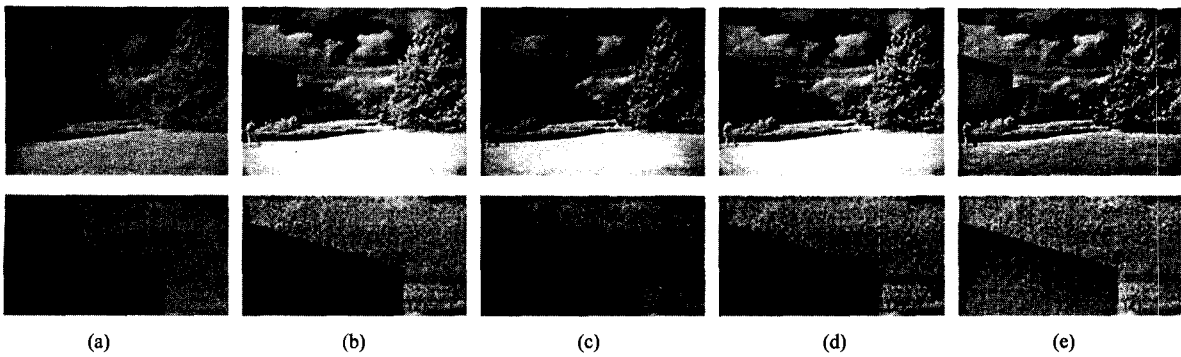


图1 红外夜景和左上角建筑放大图增强 (a) 源图 (b) HE 结果 (c) BHE 结果 (d) DHE 结果 (e) TV-Contrast 结果

Fig.1 Enhancement for a night scene, together with zooming version of a buiding (a) original image (b) HE result (c) BHE result (d) DHE result (e) TV-Contrast result

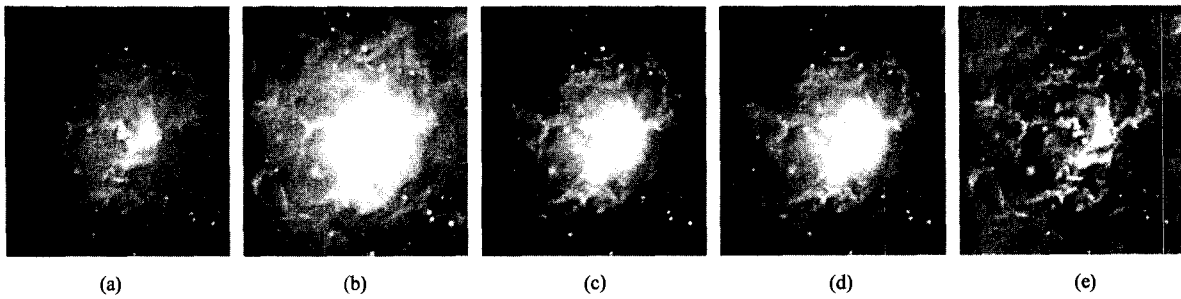


图2 红外望远镜拍摄的星云图像增强 (a) 源图 (b) HE 结果 (c) BHE 结果 (d) DHE 结果 (e) TV-Contrast 结果

Fig.2 Enhancement for nebula from IR telescope (a) original image (b) HE result (c) BHE result (d) DHE result (e) TV-contrast result

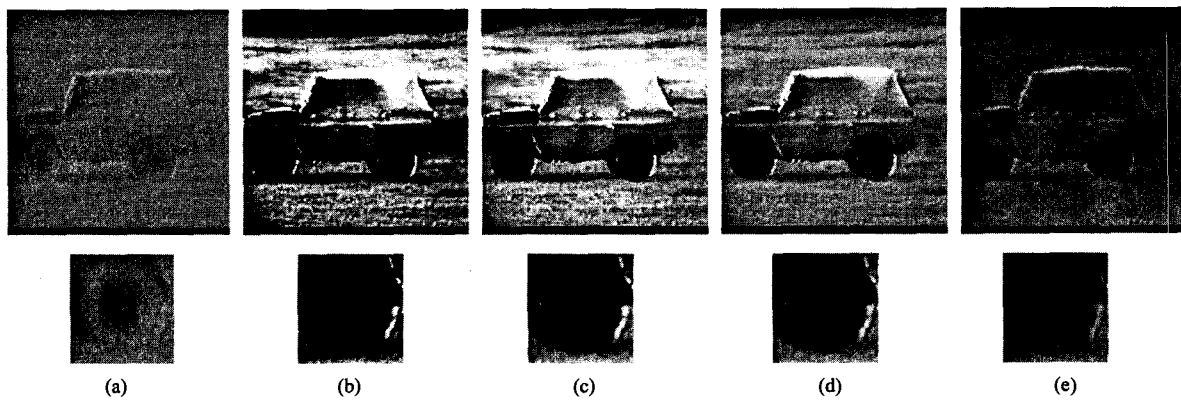


图3 野外吉普车和前轮放大图增强 (a) 源图 (b) HE 结果 (c) BHE 结果 (d) DHE 结果 (e) TV-contrast 结果

Fig.3 Enhancement for a jeep, together with zooming version of its' front wheel (a) original image (b) HE result (c) BHE result (d) DHE result (e) TV-contrast result

次限幅,故而对于图像平坦性要求的 TV 项的比重可以减少, α 较 β 小. 选取较小的 α 的另一个理由是, TV 项在噪声存在的情况下会使结果产生阶梯效应(staircase)^[11], 小的 α 会减小这种效应. 本文以下

称泛函模型式(6)为全变差-对比度(TV-contrast)模型.

1.3 全变差-对比度模型的求解

下面需要对极值问题 $\operatorname{argmin}_g \{S(g)\}$ 进行求

解. 记 F 为被积函数

$$F(g, g_x, g_y, x, y) = \alpha \sqrt{g_x^2 + g_y^2} + \beta \{ (g_x - W_1)^2 + (g_y - W_2)^2 \}, \quad (7)$$

其中 $(W_1, W_2)^T = W$, 下标 x, y 表示偏微分的变量.

根据变分方法^[12]可知, 泛函式(6)取极值时有

$$\frac{\partial F}{\partial g} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial g_x} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial F}{\partial g_y} = 0. \quad (8)$$

因此容易得到式(6)所取极值时满足的 Euler-Lagrange 方程为

$$\nabla_g S = -\alpha \nabla \cdot \left(\frac{\nabla g}{|\nabla g|} \right) - 2\beta (\nabla^2 g - \text{div} W) = 0, \quad (9)$$

其中 $\nabla_g S$ 表示泛函 $S(g)$ 对函数 g 的梯度. 那么采用梯度下降法, 可以得到其解

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla_g S, \quad (10)$$

写成时间离散迭代形式有

$$g^{k+1} = g^k + \alpha \nabla \cdot \left(\frac{\nabla g^k}{|\nabla g^k|} \right) + 2\beta (\nabla^2 g^k - \text{div} W). \quad (11)$$

泛函式(6)可能不满足凸性, 用迭代式(11)可能找不到全局最优值, 但是如果用输入原始图像作为迭代初值, 即 $g^0 = I_0$, 那么收敛得到的 g 从直观上来说正是和问题相关的解.

1.4 空域微分算子的离散化实现

上述算法中牵涉到很多微分算子, 在数字图像处理中, 必须对它们做合适的离散化才能实现. 为了保证迭代中不出现像素的移位 (spatial shift) 而降低图像的视觉质量, 应该对算子采用中心差分来代替连续微分. 但是中心差分的定义域较单向差分 (不对称差分) 大, 细节信息易模糊, 故而在生成目标梯度场 W 时用前向差分, 而对 W 的散度算子用后向差分, 仍然能保持其复合算子是中心对称的, 不会产生视觉上的位移.

同时对于分母上的 $|\nabla g|$, 为了防止出现除数为零而导致算法不稳定的情况, 仿照^[9]的处理方法, 用 $|\nabla g|_\gamma$ 来代替, 其中 γ 是一个小正数

$$x_\gamma = \sqrt{x^2 + \gamma}, \quad x \geq 0 \quad (12)$$

另外, 在这些微分算子实现的过程中, 对于图像边界点, 均采用对称延拓的方式实现, 而对于 $\text{div} W$ 的运算则采用边界补零的方式.

2 实验结果

关于上一节讨论的算法, 做了如下实验来验证.

实验中的相关参数为: $\epsilon = 3, \lambda = 3, \lambda_2 = 10, \alpha = 0.05, \beta = 0.1, \gamma = 1$ (相对于 256 灰度阶). 这些参数是根据经验选择, 在程序中固定的.

另外, 实验中采用了直方图均衡 (HE)^[13]、二分直方图均衡 (BHE)^[3] 和双向直方图均衡 (DHE)^[4] 三种方法作为对比, 其结果一并列出.

第一组实验是一幅红外夜景图像, 如图 1 所示. 根据 HE、BHE、DHE 算法增强后, 图像中表现出了较好的对比度, 黑白较为分明, 如建筑物和地面. 但是在亮暗的背景内部的微弱信息在增强图像中很难分辨, 如左上角建筑物. 建筑物顶层的一排窗户在原图和这些直方图均衡类的增强算法结果中都很难看出, 这是因为直方图类算法合并了一些灰度邻近并且分布较少的灰度, 从而丢失了相应的细节信息. 然而经过 TV-Contrast 算法增强后, 这种信息比较明显地被看出来. 实验中, TV-Contrast 算法还是产生了一定的噪声, 但是由于有了阈值限幅和 TV 平滑性约束, 噪声并没有被过分地放大, 从实验结果中看来, 输出图像的噪声水平不比三种对比的直方图算法高; 另外, TV-Contrast 确实较对比算法更好的增强了有用信息, 如窗户等.

第二组实验是美国宇航局“斯皮策”红外太空望远镜拍摄的人马座星云照片^②, 如图 2 所示. 用 HE、BHE 和 DHE 三种直方图处理算法增强后, 源图中亮星云中的层次及亮星云遮挡下的恒星就不易看出了; 而本文的 TV-Contrast 算法增强后, 不仅将原来的暗背景中的细节层次体现了出来, 同时保持了亮星云中的层次及其遮挡的恒星, 图像中各处的细节均得以保留或者增强, 总体上更加易于观察.

第三组实验是一幅野外吉普车的红外图像, 如图 3 所示. HE、BHE、DHE 三种算法的结果都过分放大了对比度, 它们可能确实各自在各自的定义上实现了直方图的平坦化, 但是并没有考虑图像实际携带信息的空间性质. 它们将原图中本来含有有用的微弱对比度完全抹去了, 这种信息所对应的图像面积小, 故而对直方图的贡献小, 很有可能被直方图处理归并成同一灰度, 从而丢失了应该保留的信息, 如图像中车辆的前轮及轮轴. 然而, 本文提出的 TV-Contrast 算法由于考虑的是局部变化信息, 只要这种变化在噪声阈值之上, 它就会被保留并放大出来, 故而“前轮”信息仍然很好的保留在增强结果中.

^② 源图像下载自 <http://www.pmo.jsinfo.net/wenben/2005/lianguo.htm>, 源图为彩色图, 实验之前将其转换成了灰度图像.

从上面的实验结果可看出本文提出的算法确实取得了较好的增强效果. 由于该算法需要采用迭代的方式来进行, 故而速度上较直方图处理类算法慢, 对于 256×256 的图像, 用 Matlab 编程运行需要 30~40s, 运行环境是 C4 - 1.7G/512M/Win2000, 相信采用 C 语言编程或采取更为有效的优化方法都将会对提升算法的运行速度有很大的帮助.

3 结语

本文提出了一种基于全变差-对比度的红外图像的变分增强算法. 该算法先后 2 次考虑噪声在图像增强中的影响: 门限预处理和 TV 约束. 可自适应增强局部小对比度的有用信息. 这种算法增强的是空间的邻域相关信息, 而直方图处理实际是一种零阶的统计信息. 实验结果表明, 本文算法能有效克服直方图类方法中可能会将邻域的微弱对比度丢弃的弱点, 并且噪声没有被过分放大, 对于红外图像是一种有效的增强方法.

致谢 感谢南京师范大学的聂守平教授提供的部分红外图像.

REFERENCES

- [1] Silverman J. Signal processing algorithms for display and enhancement of IR images [J]. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 1993, **2020**:440—450.
- [2] Vickers V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery [J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(7):1921—1926.
- [3] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1997, **43**(1):1—8.
- [4] CHEN Qian, BAI Lian-Fa, ZHANG Bao-Min. Histogram double equalization in infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(6):428—430.
- [5] ZHANG Chang-Jiang, FU Meng-Yin, JIN Mei, et al. Approach to enhancement contrast of infrared image based on wavelet transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张长江, 付梦印, 金梅, 等. 一种红外图像对比度增强的小波变换法. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2):119—124.
- [6] WANG Chao, YE Zhong-Fu. Variational approach to image enhancement and pseudo-color mapping [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing* (王超, 叶中付. 一种基于变分的图像增强算法和伪彩色映射. *数据采集与处理*), 2005, **20**(1):18—22.
- [7] Highnam R, Brady M. Model-based image enhancement of far infrared images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, **19**(4):410—415.
- [8] Tang M, Ma S D, Xiao J. Model-based adaptive enhancement of far infrared image sequences [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2000, **21**:827—835.
- [9] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D*, 1992, **60**:259—268.
- [10] XIE Mei-Hua, WANG Zheng-Ming. SAR Image enhancement based on regularization variation model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢美华, 王正明. 基于正则化变分模型的 SAR 图像增强方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):467—471.
- [11] Chan T F, Esedoglu S, Park F E. A fourth order dual method for staircase reduction in texture extraction and image restoration problems [R]. *Technical Report, UCLA*, 2005, cam05—28.
- [12] XU Jian-Ping, GUI Zi-Peng. *Variational Approach* [M]. Shanghai: Tongji University Press (徐建平, 桂子鹏. 变分方法. 上海: 同济大学出版社), 1999, 13—17.
- [13] ZHANG Yu-Jin. *Image Engineering (I)——Image Processing and Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (章毓晋. 图象工程(上册)——图象处理和分析. 北京: 清华大学出版社), 1999, 76—81.