

文章编号:1007-2780(2014)02-0281-05

基于变分偏微分方程的红外图像增强算法研究

赵文达^{1,2*}, 赵建¹, 韩希珍¹, 续志军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对红外图像具有对比度低、边缘模糊的缺点,提出一种基于变分偏微分方程理论的红外图像增强方法。通过重建图像梯度场的分布,以此增强图像中纹理细节不明显、对比度小的微弱信息。在梯度场的变换中对噪声的幅值切割,完成了对噪声处理。结果表明本算法使得原图像的灰度平均梯度值提高 2~3 倍,对增强红外图像的边缘和微弱有用信息效果明显,避免了直方图均衡类算法丢失一些灰度相近且分布较少的微弱细节信息的缺点,为图像识别和跟踪应用提供了高质量的图像信息。

关键词:图像处理;红外图像增强;偏微分方程;直方图

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20142902.0281

Infrared image enhancement based on variational partial differential equations

ZHAO Wen-da^{1,2*}, ZHAO Jian¹, HAN Xi-zhen¹, XU Zhi-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Infrared images typically have the problems of low-contrast and blur edges. This article introduces the variation theory of partial differential equations to enhance the infrared images. By reconstructing image gradient field distribution, detailed texture and low-contrast can be improved. The processing of noise consists the cut of amplitude in the transform of gradient field. Based on experiment results, the original image gray gradient can be increased by 2~3 times and therefore significantly enhances the faint information and alleviates the edge effects. This approach can effectively overcome the problem of losing similar gray scale distribution caused by the histogram class algorithms. Therefore, it gives qualified image information for image recognition and tracking application.

Key words: image processing;infrared image enhancement;partial differential equations;histogram

收稿日期:2013-03-01;修订日期:2013-04-13.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61137001)

* 通信联系人, E-mail:798915565@qq.com

1 引言

随着红外成像技术的发展,红外图像在遥感探测、医疗卫生、公共安全、交通运输以及军事等领域取得了越来越广泛的应用。但由于红外探测器件的光敏响应的不均匀性,系统的非线性以及受外界环境的干扰,使得红外图像具有噪声大,目标边缘模糊和纹理细节不清楚的缺点。因此,需要对红外图像进行增强,使图像适合计算机的识别和系统跟踪应用^[1-3]。

已有的图像增强算法很多^[4-6],主要分为空域法和频域法两类。空域法是直接对图像像素灰度进行操作,主要包括直接灰度变换、空域滤波和直方图处理等。该方法运算量小实时性好,缺点是不能从频率角度反映图像各部分的区别,图像分辨率差。频域法是对图像进行傅里叶变换后对其频谱再进行分析操作,然后通过反变换获得处理后的结果,主要包括傅里叶变换和小波变换等。该方法具有很好的频率处理能力,但计算量大实时性差。近年来,基于变分偏微分方程的图像处理技术以其精度高、将图像转换为数学模型便于处理等优点倍受青睐。该技术将图像看作是连续区域进行数学建模,求解时将其转化为随时间变化的离散格式。并将图像离散为间距很小的网格,如梯度、散度等偏微分算子采用差分法进行表述。

本文将变分偏微分方程理论用于红外图像的增强,主要是构造一个随着梯度值增大而减小的函数(≥ 1)作为原图像梯度场的系数,增强微弱的有用细节,突出图像的边缘。从变换后的梯度场重建出增强的图像采用变分偏微分方程理论,并对该算法采用有限差分法进行求解。最后通过与现有的直方图均衡和平台直方图均衡算法做主观和客观比较,验证本文算法的优越性。

2 红外图像的变分偏微分增强

结合变分偏微分方程思想,本文在图像的梯度域,通过增强图像的梯度场来达到增强图像边缘和细节的目的。对于

$$I(x, y) \left((x, y) \in \Omega = [0, N-1] \times [0, M-1] \right)$$

的红外图像,图像中某点 p 的梯度定义:

$$\nabla I p = \left[\frac{\partial I p}{\partial x}, \frac{\partial I p}{\partial y} \right] p = (i, j) \in \Omega \quad (1)$$

梯度值代表灰度变化的速度,矢量的方向代表灰度朝哪个方向变化。图像的每个像素点的梯度总和组成了梯度矢量场^[7]。

图像梯度值大的地方,纹理细节看上去就比较清楚。所以,重建图像的梯度场时,在梯度值小的微弱细节,增加梯度值,增强微弱细节,在梯度值比较大的边缘区域,适当增加梯度值,使图像边缘更加突出。因此,构造一个随着梯度值增大而减小的函数 $g(|\nabla I|)$ 作为原图像梯度场的系数,得到如下重建的梯度场 T :

$$T = \begin{cases} g(|\nabla I|) \times \nabla I, & |\nabla I| \geq \epsilon \\ 0, & |\nabla I| < \epsilon \end{cases} \quad (2)$$

其中: $g(|\nabla I|) = I + r_1 \frac{(r_2 - |\nabla I|)(|\nabla I| + r_3)}{1 + |\nabla I|^2 / r_4}$, ϵ 为噪声门限值,当梯度小于 ϵ 时,认为是噪声。 $r_1 = 0.005$, $r_2 = 100$, $r_3 = 20$, $r_4 = 15$, 函数 $g(|\nabla I|)$ 与梯度值的关系如图 1 所示。

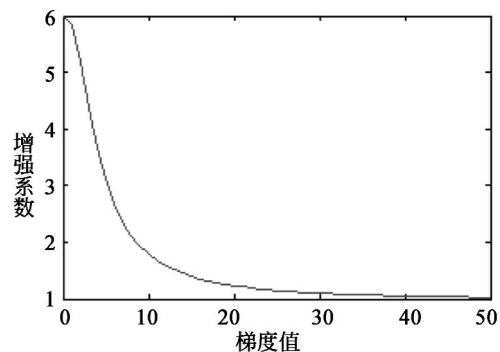


图 1 梯度场增强系数与梯度值关系

Fig. 1 Relationship between gradient field enhancement coefficient and gradient value

通过图 1 的梯度值与函数的关系可以看出:当梯度值非常小时,梯度场增强系数最大,可以增强图像的微弱细节;随着梯度值的增加,梯度场增强系数逐渐减小,最后趋向于 1,防止了大的梯度值被过分增大,从而增强的图像看上去比较柔和。选择不同的梯度门限 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 的值,可以控制梯度场增强的大小即图像对比度的大小。

从变换之后的梯度场中重建出增强图像,即是寻找增强的图像 $u(x, y)$,使如下的泛函最小:

$$E(u) = \iint_{\Omega} |\nabla u - T|^2 dx dy, \quad (3)$$

其中: $\mathbf{T}$ 为重建的梯度场。

3 泛函的求解

常见的求解泛函极值的方法主要有:变分法,遗传算法,最大值原理等,但在图像处理应用中,变分法最为常用。记 $F(x, y, u, u_x, u_y)$ 为被积函数,则

$$F(x, y, u, u_x, u_y) = |\nabla u - \mathbf{T}|^2 = (u_x - T_1)^2 + (u_y - T_2)^2, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{T} = (T_1, T_2)$, ∇ 为梯度算子, $\nabla u = (u_x, u_y)$, x, y 表示偏微分的变量。根据变分法原理^[8]可知,泛函 $E(u)$ 取极值时有

$$F_u - \frac{\partial F}{\partial x} F_{u_x} - \frac{\partial F}{\partial y} F_{u_y} = 0, \quad (5)$$

式中, $F_{u_x} = \frac{\partial F}{\partial u_x}$, $F_{u_y} = \frac{\partial F}{\partial u_y}$ 。将式(4)代入并化简得到如下的 Euler-Lagrange 方程

$$\Delta u - \operatorname{div} \mathbf{T} = 0, \quad (6)$$

式中: Δ 为拉普拉斯算子, $\mathbf{T}$ 为重建的梯度场, $\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 。由于欧拉偏微分方程的直接求解非常困难,通常用梯度下降法迭代进行求解。梯度下降法的基本思想是:沿着梯度的反方向,从初始函数 u_0 出发进行迭代,迭代到 $E(u)$ 的局部极小值停止^[9]。根据梯度下降法,离散迭代以下的欧拉偏微分方程就可以得到 $E(u)$ 的极小值点。

$$\begin{cases} u_{t=0} = u_0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -\left(F_u - \frac{\partial F}{\partial x} F_{u_x} - \frac{\partial F}{\partial y} F_{u_y}\right) = -(\Delta u - \operatorname{div} \mathbf{T}) \end{cases} \quad (7)$$

当泛函 $E(u)$ 是凸函数时,算法总可迭代收敛到全局极值点。式(7)中的参数 t 称为时间行进参数,它描述了函数 u 的连续逼近过程,直至到达泛函 $E(u)$ 的极小值函数,此时欧拉偏微分方程的演化速度消失: $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ 。

上式中存在许多微分算子,在数字图像处理中须对其离散化求解。有限差分法是对待此类问题的常用方法,首先对图像进行等间隔采样^[10],本文取采样步长 $\Delta x, \Delta y$ 为 1。拉普拉斯算子应用向前差分,散度应用向后差分。

时间偏微分:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} \Big|_p^n \approx \frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t}. \quad (8)$$

空间偏微分:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x + \Delta x, y) - u(x, y)}{\Delta x} = u(x + 1, y) - u(x, y). \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{u(x, y + \Delta y) - u(x, y)}{\Delta y} = u(x, y + 1) - u(x, y). \quad (10)$$

拉普拉斯算子应用:

$$\Delta u = u(i + 1, j) + u(i - 1, j) + u(i, j + 1) + u(i, j - 1) - 4u(i, j). \quad (11)$$

散度采用向后差分近似:

$$\operatorname{div} \mathbf{T} = T_1(i, j) - T_1(i - 1, j) + T_2(i, j) - T_2(i, j - 1). \quad (12)$$

结合公式(8)~(12)可得公式(7)的迭代过程如下

$$\begin{aligned} u^{n+1}(i, j) = & u^n(i, j) - \Delta t \left[u^n(i + 1, j) + u^n(i - 1, j) + u^n(i, j + 1) + u^n(i, j - 1) - \right. \\ & \left. 4u^n(i, j) \right] - \left[T_1(i, j) - T_1(i - 1, j) + T_2(i, j) - T_2(i, j - 1) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

在以上数值计算过程中,采用时域有限差分法,通过对图像的迭代来找到最优效果的增强图像。有限差分法高效简单,通常通过有限次数的迭代就可找到视觉效果好的图像。

4 实验结果与分析

对比于直方图均衡、平台直方图均衡^[11]算法,本文做了大量的实验来证明本文算法的优越性,选择其中两组有代表性的图像进行说明。在算法中,取 $\epsilon = 4$, $r_1 = 0.005$, $r_2 = 100$, $r_3 = 20$, $r_4 = 15$, $\Delta t = 1$,迭代次数 $n = 15$ 。处理结果如图 2、图 3 所示。

通过图 2 可以看出:直方图均衡化可以有效地调节图像的亮度,但会使图像“过亮”,而且会使一些灰度相近、分布较少的灰度值的细节信息被抹去,如图 2 的车轮;平台直方图均衡化给图像细节的提升留出了空间,使图像的亮度比较均匀,但平台值很难确定,实验中的平台值使图 2(c)中远处的树林比较清晰,但车仍然模糊;经过本文算法增强后,图像的微弱细节得以增强,如图 2 中的车

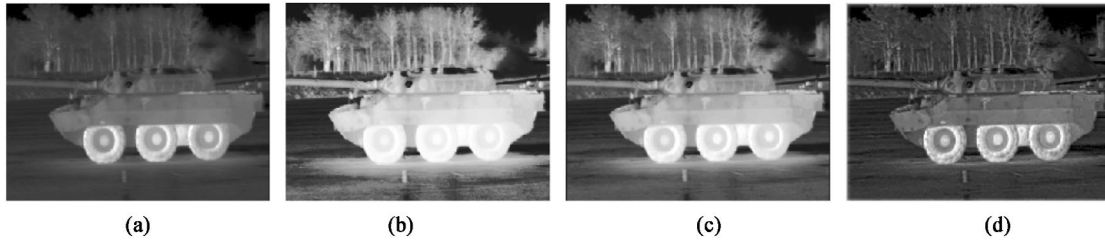


图 2 红外原图及其经过各种增强算法后的对比。(a)原图;(b)直方图均衡化;(c)平台直方图均衡化;(d)本文算法。

Fig. 2 Contrast between Infrared original image and various enhancement algorithms. (a) Original image; (b)Histogram equalization; (c)Platform histogram equalization; (d)The algorithm.

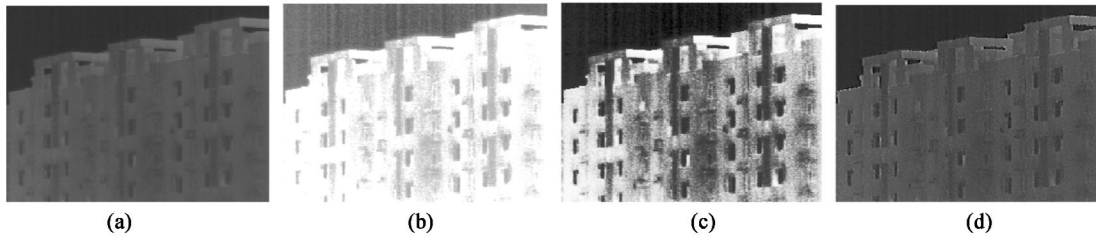


图 3 红外原图及其经过各种增强算法后的对比。(a)原图;(b)直方图均衡化;(c)平台直方图均衡化;(d)本文算法。

Fig. 3 Contrast between infrared original image and various enhancement algorithms. (a) Original image; (b)Histogram equalization; (c)Platform histogram equalization; (d)The algorithm.

轮、远处的树林。图 3 为含有较大噪声的图片,通过对比可以看出,图片(b)和(c)噪声明显,而本文算法对原图像的噪声并没有过分放大,如图片(d)

左上角的天空。

本文采用灰度平均梯度值(GMG)作为客观评价标准。表达式为:

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(\Delta I_x)^2 + (\Delta I_y)^2}{2}}. \quad (14)$$

GMG 是将一幅图像长 M 和宽 N 方向上的相邻像素的灰度值分别做差,然后求平方和,最后求均方根。它能反应图像的纹理特征变化和图像的对比度,其值越大就说明图像越清晰。现计算上面 2 组图的 GMG,结果如表 1 所示。

表 1 4 幅红外图像的 GMG

Tab. 1 GMG of four infrared images

红外图像	(a)	(b)	(c)	(d)
图 2 的 GMG	3.885	8.443	6.249	9.693
图 3 的 GMG	2.385	6.710	7.253	7.618

5 结 论

提出一种基于变分偏微分方程理论的红外图

像增强方法。该方法首先将原图像变换到梯度域,然后构造一个随着梯度值增大而减小的函数(≥ 1)作为原图像梯度场的系数,增强图像微弱的有用细节,突出图像的边缘,最后通过变分偏微分方程理论从变换后的梯度场重建出增强的图像。考虑到噪声可能会被同时放大,在梯度场的变换中对噪声进行了限幅。实验结果中,本文算法将原图像的灰度平均梯度 3.885 和 2.385 分别增加到 9.693 和 7.618,提高了 2~3 倍,对增强红外图像的边缘和微弱有用信息效果明显,避免了直方图均衡类算法丢失一些灰度相近且分布较少的微弱细节信息的缺点,为图像识别和跟踪应用提供了高质量的图像信息。

参 考 文 献:

- [1] 李一芒,何昕,魏仲慧,等.采用降维技术的红外目标检测与识别[J].光学精密工程,2013,21(5):1297-1303.
Li Y M, He X, Wei Z H, *et al.* Infrared target detection and recognition using dimension reduction technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1297-1303. (in Chinese)
- [2] 李一芒,何昕,魏仲慧.红外预警实时图像处理系统设计与实现[J].液晶与显示,2013,28(1):110-114.
Li Y M, He X, Wei Z H. Design and implement of real-time image processing system for IR warning system based on multi-passage [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 110-114. (in Chinese)
- [3] 占必超,吴一全,纪守新.基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J].光学学报,2010,30(10):2788-2793.
Zhan B C, Wu Y Q, Ji S X. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2788-2793. (in Chinese)
- [4] 贾宏光,吴泽鹏,朱明超,等.基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强[J].光学精密工程,2013,21(12):3272-3282.
Jia H G, Wu Z P, Zhu M C, *et al.* Infrared image enhancement based on generalized linear operation and bilateral filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3272-3282. (in Chinese)
- [5] 尹传历,王啸哲.机载嵌入式图像增强系统设计与实现[J].液晶与显示,2013,28(4):604-607.
Yin C L, Wang X Z. Design and realization of airborne embedded image enhancement system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 604-607. (in Chinese)
- [6] 王静轩,尹传历.基于 DSP 和 FPGA 的嵌入式实时图像增强系统[J].液晶与显示,2013,28(3):459-463.
Wang J X, Yin C L. Embedded color image enhancement system based on DSP and FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 459-463. (in Chinese)
- [7] 王超,叶中付.一种基于变分的图像增强算法和伪彩色映射[J].数据采集与处理,2005,20(1):18-22.
Wang C, Ye Z F. Variational approach to image enhancement and pseudo-color mapping [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2005, 20(1): 18-22. (in Chinese)
- [8] 老大中.变分法基础[M].北京:国防工业出版社,2007.
Lao D Z. *Variational Method Foundation* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 朱才志.基于偏微分方程的数字图像处理的研究[D].安徽:中国科学技术大学,2007.
Zhu C Z. Researches on digital image processing based on partial differential equation [D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [10] 韩希珍,赵建.结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J].光学精密工程,2012,20(6):1382-1388.
Han X Z, Zhao J. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1382-1388. (in Chinese)
- [11] 王炳健,刘上乾,周慧鑫,等.基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J].光子学报,2005,34(2):299-301.
Wang B J, Liu S Q, Zhou H X, *et al.* Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 299-301. (in Chinese)

作者简介:赵文达(1987—),男,辽宁凌源人,博士,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail:798915565@qq.com