



引用格式:陈继光,苏冰山. 基于改进总广义变分的单幅红外图像超分辨率算法[J]. 轻工学报,2020,35(4):103-108.

中图分类号:TP391 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.04.014

文章编号:2096-1553(2020)04-0103-06

基于改进总广义变分的 单幅红外图像超分辨率算法

Single infrared image super-resolution algorithm based on improved total generalized variation

陈继光,苏冰山

CHEN Jiguang, SU Bingshan

关键词:

红外图像超分辨率;
总广义变分;
梯度锐化算子;
正则化

郑州航空工业管理学院 智能工程学院,河南 郑州 450046

School of Intelligent Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China

Key words:

infrared image
super-resolution;
total generalized
variation(TGV);
graduate sharpening
operator;regularization

摘要:针对传统总广义变分(TGV)算法在红外图像超分辨率重建过程中难以有效抑制噪声的问题,提出了一种基于改进TGV的单幅红外图像超分辨率算法.该算法首先将二阶TGV模型与一阶梯度锐化算子相结合,在算法实现的梯度上升阶段加上一阶梯度锐化算子,在梯度下降阶段的系数中加上一阶梯度锐化算子的系数,得到一种新的红外图像超分辨率正则化模型;然后采用一阶主-对偶优化算法求得高分辨率红外图像.实验结果表明,该算法的主观视觉效果和客观评价指标均优于其他传统算法,可获得质量较高的高分辨率红外图像,能有效抑制噪声,降低硬件实现的复杂度,有较强的实用性.

收稿日期:2020-03-13

基金项目:河南省科技攻关计划(高新技术领域)项目(172102210529);河南省高等学校重点科研计划项目(17A520062)

作者简介:陈继光(1982—),男,河南省睢县人,郑州航空工业管理学院讲师,博士,主要研究方向为图像处理、无线传感网络.

Abstract: Aiming at the problem that the traditional total generalized variation (TGV) algorithm could not restrain noise effectively in the process of infrared image super-resolution, a single infrared image super-resolution algorithm based on improved TGV was proposed. Firstly, the algorithm was built by second-order TGV regularization model and first-order gradient sharpening operator. First-order gradient sharpening operator was added during the process of gradient ascent, and the factor of first-order gradient sharpening operator was added during the process of gradient descent, so this algorithm acquired a new kind of infrared image super-resolution regularization model. Then it inferred the high-resolution infrared image with a first-order primal-dual optimization scheme. The experimental results showed that the algorithm was superior to other traditional algorithms in terms of subjective visual effect and objective evaluation index, and could obtain high-quality high-resolution infrared images, effectively suppress noise and reduce the complexity of hardware implementation, and had strong practicality.

0 引言

红外图像能够反映出成像场景的热力学信息,在快速体温检测、军事信息侦察等方面应用广泛,但是由于受红外成像原理和硬件设备技术水平的限制,红外相机直接获得的红外图像分辨率较低,边缘模糊且存在噪声.因此,提高红外图像的分辨率成为亟待解决的问题^[1-5].文献[1]将总广义变分 TGV (total generalized variation) 正则化方法与各向异性张量^[2]相结合,由高分辨率可见光图像引导低分辨率图像进行超分辨率重建,但各向异性张量在获取可见光图像边缘的同时,也增加了噪声的来源和种类,致使重建的图像被多种噪声污染.文献[3]通过一种改进的二阶 TGV 正则化模型重建红外图像,重建的高分辨率图像中红外图像自身的噪声得到抑制,采用相位一致^[4]边缘提取算法减少了可见光图像噪声的干扰,但由于引入了同场景的可见光图像信息,致使重建结果出现一定程度的失真.文献[5]将红外图像和同场景的可见光图像的边缘进行相关性分类,得到红外图像的高频信息,而后将其与 TGV 模型相结合得到最终的高分辨率红外图像.以上算法均为基于多传感器的红外图像超分辨率重建算法,可见光图像的信息会对红外图像的重建结果产生干扰,同样会携带噪声.在实际应用中,

基于多传感器的红外图像超分辨率算法在硬件系统实现时较为复杂,并且不同类的图像需经过配准才能结合起来实现算法,实用性不强.

基于单一类型传感器的超分辨率算法具备噪声来源少、设备复杂度低等优点,因此得到广泛关注.文献[6]通过最小角度回归算法和基于稀疏表示的超分辨率方法重建了红外图像;文献[7]借助孔径编码器和稀疏表示实现了对红外图像的超分辨率重建;文献[8]通过划分区域求得自适应全变分因子,以此合成高分辨率红外图像;文献[9]将 Huber 范数与全变分模型结合起来得到新的正则化模型,以此获得重建的高分辨率红外图像;文献[10]利用傅里叶变换和互关联法配准有亚像素偏移的低分辨率图像,采用基于重构的方法获得高分辨率红外图像.以上方法虽均可实现基于单一传感器的红外图像超分辨率重建,但未能针对红外图像的自身特点有效抑制图像中存在的噪声.

传统 TGV 正则化模型可以有效保留超分辨率重建图像的边缘,实现基于单一红外传感器的红外图像超分辨率重建,但是不能有效抑制红外图像的噪声^[11].鉴于此,本文拟提出一种基于改进 TGV 的单幅红外图像超分辨率算法,对单一红外传感器获取的图像进行处理,将二阶 TGV 模型与一阶梯度锐化算子相结合,重建高分辨率红外图像,以期降低硬件设备复杂

度并有效抑制图像噪声。

1 算法设计与实现

本文在文献[1]的基础上提出一种基于改进 TGV 的单幅红外图像超分辨率算法,去除在红外图像超分辨率重建过程中的可见光图像信息,同时将一阶梯度锐化算子引入 TGV 正则化模型,得到一种新的红外图像超分辨率重建模型,进而采用一阶主-对偶^[12]优化算法求得高分辨率红外图像。

1.1 超分辨率图像重建原理

在图像的获取过程中,外界的干扰和成像条件的限制导致不能获取原始场景中的所有真实信息,采集到的图像质量较低。一般而言,引起图像退化的原因有很多,比如传感器自身相对场景运动产生的运动系统噪声、模糊,光学成像系统的下采样、衍射等。在进行图像超分辨率实验时,低分辨率图像是原始高分辨率图像经过运动效应(包括平移和旋转)、模糊效应、下采样、加噪声处理后得到的图像。图像退化模型为

$$I_s = JBMX + n$$

其中, I_s 表示低分辨率图像, X 表示高分辨率图像, J 表示下采样矩阵, B 表示模糊算子, M 表示几何运动算子, n 表示噪声。图像超分辨率重建就是通过一个低分辨率图像 I_s 重建相应的高分辨率图像 X 的过程。

图像超分辨率重建问题的数学本质是一个不适定的逆问题,一般将低分辨率图像的获取看成是正问题,即低分辨率图像是系统输出,而

待重建的高分辨率目标图像是系统输入,那么求解高分辨率图像的过程就是逆问题的解决过程。为了解决这个逆问题,结合图像的一些先验知识对超分辨率重建算法的重建结果进行约束,进而获取图像采集时丢失的高频信息,重建高分辨率图像的最优解。

1.2 算法框架

本文算法框图如图 1 所示,该算法迭代求解出最优化条件下的超分辨率重建图像:

$$I_H = \arg \min_I \{R(I) + S(I, I_s)\}$$

上式由正则约束项 $R(I)$ 和数据项 $S(I, I_s)$ 组成, I 为红外图像超分辨率重建的中间结果。正则约束项利用图像的先验约束条件对重建的近似解空间进行约束,得到边缘相对清晰的唯一解,本文对传统 TGV 正则约束项做出改进,增加了一阶梯度锐化算子;数据项主要用于控制重建后的高分辨率红外图像与原始低分辨红外图像的逼近程度,得到接近低分辨率原图的高分辨率图像。

1.3 算法实现

对于红外图像超分辨率来说,二阶 TGV 正则化效果较好,且运算量适合实际应用,其表达式为

$$TGV = \min_v \{a|\nabla I - v| + b|\nabla v|\}$$

其中, v 为 TGV 正则约束项中的对称矩阵, a 和 b 分别为用于控制二阶项与一阶项所占比重的标量参数。

图像梯度运算通过微分计算,可以突出图像的边缘信息并抑制随机噪声。红外图像存在噪声,并且具有边缘模糊、对比度低的特点,而

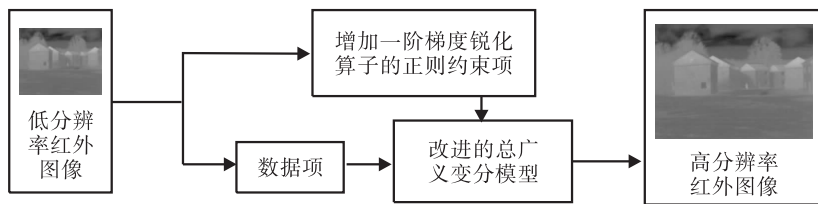


图 1 本文算法框图

Fig. 1 Block diagram of algorithm

一阶梯度锐化算子可以抑制随机噪声,增强模糊的细节或者低对比度图像的边缘,因此本文利用一阶梯度锐化算子改进 TGV 正则约束项,其表达式为

$$GTGV = \min_v \{ a |\nabla I - v| + b |\nabla v| + c \nabla I \}$$

其中, ∇ 为梯度运算符号,标量 c 为权重参数. 改进后的正则约束项可有效保留重建图像的边缘并抑制噪声.

本文将数据项与正则约束项相结合,得到算法的目标函数:

$$I_H = a |\nabla I - v| + b |\nabla v| + c \nabla I + |(D(I) - I_s)|^2 \quad (1)$$

其中, D 代表数据项中对待求解高分辨率红外图像信息的处理过程,使得低分辨率红外图像和高分辨率红外图像的像素处于同一个空间. 目标函数采用一阶主 - 对偶优化方法实现,然后利用梯度下降法求得最优解. 由此,式 (1) 可转化为

$$I_H = \min_{I,v} \max_{p,q} \langle [a(\nabla I - v) + c \nabla I], p \rangle + b \langle \nabla v, q \rangle + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{i,j} - I_{s,i,j})^2$$

其中, $M \times N$ 即为待求的高分辨率红外图像的分辨率, p 和 q 为主 - 对偶优化算法中的对偶变量.

在主 - 对偶优化算法中,主变量 I, v 和对偶变量 p, q 通过迭代计算求得本文算法的收敛优化解. 第一次迭代时, $I = I_s$, 令 $v, p, q = 0$, 步长 θ_p, θ_q 均设为大于 0 的常数,迭代计算的 3 个过程如下.

1) 梯度上升迭代更新对偶变量:

$$\begin{cases} p^{n+1} = \frac{p^n + \theta_p [c \nabla I_0^n + a(\nabla I_0^n - v_0^n)]}{\max(1, |p^n + \theta_p [c \nabla I_0^n + a(\nabla I_0^n - v_0^n)]|)} \\ q^{n+1} = \frac{q^n + \theta_q b \nabla v_0^n}{\max(1, |q^n + \theta_q b \nabla v_0^n|)} \end{cases}$$

2) 梯度下降迭代更新主变量:

$$\begin{cases} I^{n+1} = \frac{I^n + k_l [(c + a) \nabla^T p^{n+1} + I_s]}{1 + k_l} \\ v^{n+1} = v^n + k_v (a p^{n+1} + b \nabla^T q^{n+1}) \end{cases}$$

其中, k_l 和 k_v 为步长^[13].

3) 进一步优化主变量:

$$\begin{cases} I_0^{n+1} = I^{n+1} + \mu(I^{n+1} - I_0^n) \\ v_0^{n+1} = v^{n+1} + \mu(v^{n+1} - v_0^n) \end{cases}$$

其中, I_0 和 v_0 为迭代计算的中间结果, μ 的值在每次迭代时进行更新^[13].

2 实验结果与分析

将最近邻插值算法、双立方插值算法、基于传统 TGV 模型的算法与本文算法进行实验对比,从主观视觉效果和客观评价指标两方面对本文算法进行评价. 在实验中,各参数取经验值,分别为 $a = 0.6, b = 3, c = 0.24, \theta_p = 0.33, \theta_q = 0.5, \mu$ 的初值取 0.77,实验平台为 Matlab R2010a.

实验图像源于俄勒冈州立大学的可见光和红外图像库. 图 2 为实验用的部分低分辨率红外图像,图像分辨率均为 160 像素 \times 120 像素.



图 2 低分辨率红外图像

Fig. 2 Low-resolution infrared images

图3—5中a)—d)分别是4种算法对应于图2中3个图像的2倍超分辨率重建的实验结果,其中,图片的分辨率均为320像素×240像素。不同超分辨率算法的峰值信噪比(PSNR)如表1所示。

由图3—5可知,从主观视觉效果来看,最近邻插值算法和双立方插值算法未能有效抑制噪声,也未能保留图像边缘;基于传统TGV模型的算法有效保留了图像边缘,但对噪声的抑

制不够;本文算法图像边缘清晰,视觉效果更好,这是因为红外图像中的噪声有相当一部分是随机噪声,一阶梯度锐化算子的引入有效抑制了随机噪声并锐化图像边缘。

PSNR值越大,说明图像质量越高。由表1可知,最近邻插值算法和双立方插值算法的PSNR值较低;基于传统TGV模型算法的PSNR值高于最近邻插值算法和双立方插值算法,质量较好;本文算法的PSNR平均值高于其他3种算法,重建图像质量最高。

综上,实验结果从客观评价指标方面验证了

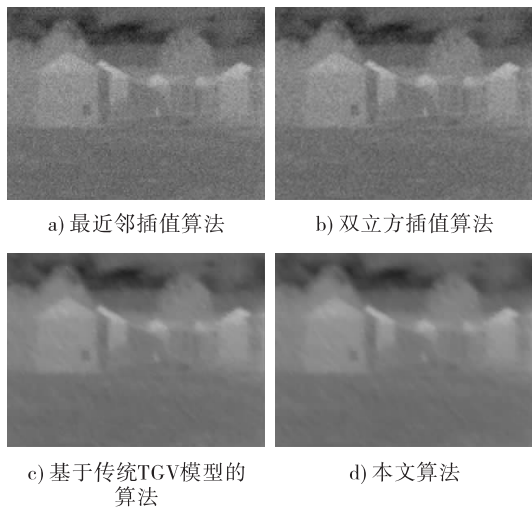


图3 不同算法所得房屋图像超分辨率重建结果
Fig. 3 The super-resolution results of house image of different algorithms

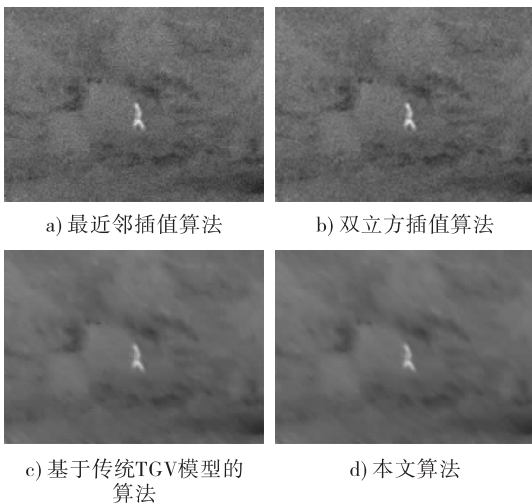


图4 不同算法所得森林图像超分辨率重建结果
Fig. 4 The super-resolution results of woods image of different algorithms

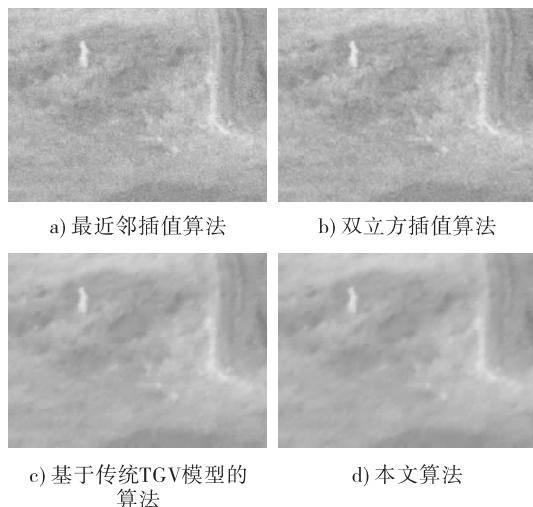


图5 不同算法所得山岭图像超分辨率重建结果
Fig. 5 The super-resolution results of hill image

表1 不同超分辨率算法的PSNR值

Table 1 PSNR values of different super-resolution algorithms

图像	最近邻插值算法	双立方插值算法	基于传统TGV模型的算法	本文算法
轮船	28.707 3	30.187 7	31.759 9	31.760 6
广场	28.165 6	29.603 7	29.860 3	29.778 9
房屋	29.318 7	30.956 3	34.283 1	34.562 5
雾中的房屋	29.214 4	30.851 4	34.087 3	34.275 7
河岸	28.891 6	30.497 6	32.683 1	32.718 0
树林和行人	28.965 2	30.508 9	32.522 4	32.598 9
树林	29.106 2	30.716 0	32.337 6	32.559 6
树林和道路	29.097 5	30.630 9	32.936 7	33.066 0
PSNR 平均值	28.933 3	30.494 1	32.558 8	32.665 0

本文算法在抑制红外图像噪声的同时,提高了超分辨率红外图像的质量。

3 结语

本文提出的基于改进 TGV 的单幅红外图像的超分辨率算法将二阶 TGV 模型和一阶梯度锐化算子相结合,一阶梯度锐化算子的引入使得本文算法有效地抑制了图像中的噪声. 实验结果表明,本文算法效果优于传统算法,并且降低了硬件实现的复杂度,实用性较强. 下一步可将其他图像超分辨率模型的正则约束项与 TGV 正则约束项相结合,改进正则约束项和数据项,建立对红外图像特点更加有针对性的正则化模型。

参考文献:

- [1] FERSTL D, REINBACHER C, RANFTL R, et al. Image guided depth upsampling using anisotropic total generalized variation [C] // IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2013: 993.
- [2] WERLBERGER M, TROBIN W, PORK T, et al. Anisotropic huber-L1 optical flow [C] // Proceedings of the British Machine Vision Conference. [S. l. : s. n.], 2009: 1.
- [3] 苏冰山, 吴炜, 杨晓敏, 等. 一种基于多传感器的红外图像正则化超分辨率算法 [J]. 光电子激光, 2015, 26(2): 368.
- [4] KOVESI P. Phase congruency detects corners and edges [C] // Proceedings of Digital Image Computing: Techniques and Applications. Sydney: [s. n.], 2003: 309.
- [5] 苏冰山, 陈继光, 陈雨. 基于改进总广义变分的红外图像超分辨率算法 [J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(22): 193.
- [6] 戚曹, 朱桂斌, 唐鉴波, 等. 基于稀疏表示的红外视频图像超分辨率算法 [J]. 计算机工程, 2016, 42(3): 278.
- [7] 王新华, 欧阳继红, 庞武斌. 压缩编码孔径红外成像超分辨率重建 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(4): 1239.
- [8] 翟海天, 李辉, 李彬. 基于区域划分的红外超分辨率重建 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2989.
- [9] PANAGIOTOPOULOU A, ANASTASSOPOULOS V. Super-resolution reconstruction of thermal infrared images [C] // Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on REMOTE SENSING. [S. l. : s. n.], 2011: 40.
- [10] WANG J, RALPH J F, GOULERMAS J Y. An analysis of a robust super resolution algorithm for infrared imaging [C] // Proceedings of the 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. Piscataway: IEEE, 2009: 158.
- [11] KONGSKOV D R, DONG Y Q, KNUDSEN K. Directional total generalized variation regularization [J]. BIT Numerical Mathematics, 2019, 59(4): 903.
- [12] ESSER E, ZHANG X Q, CHAN T F. A general framework for a class of first order primal-dual algorithms for convex optimization in imaging science [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2010, 3(4): 1015.
- [13] CHAMBOLLE A, PORK T. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2011, 40: 120.