

文章编号: 1672-8785(2016)05-0027-06

超分辨率重建算法在热红外图像中的应用

曹嘉豪 李春来 金 健 姬弘桢 张旭东

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 高空间分辨率的热红外图像能够提供更多关于目标场景的细节信息, 因而在计算机视觉、医学和遥感等诸多领域有着广泛的应用需求。由于通过提升热红外相机硬件性能的方式往往需要付出高昂的代价, 因此我们选择通过超分辨率重建的方式来提高热红外图像的空间分辨率。本文所重建的热红外图像来源于舟山航拍试验, 所用热红外相机由自主设计搭载。分别采用凸集投影法和迭代反投影法对热红外序列图像进行了超分辨重建。实验结果表明, 这两种算法均能有效提高热红外图像的空间分辨率。

关键词: 超分辨率重建; 热红外图像; 凸集投影法; 迭代反投影法

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.05.006

Application of Super Resolution Reconstruction Algorithm in Thermal Infrared Image

CAO Jia-hao, LI Chun-lai, JIN Jian, JI Hong-zhen, ZHANG Xu-dong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Since high spatial resolution thermal infrared images can provide more details of target scenes, they are widely used in the fields of computer vision, medicine and remote sensing etc. Because it is usually more expensive to improve the performance of a thermal infrared camera, the super-resolution reconstruction algorithm is selected to improve the spatial resolution of thermal infrared images. The thermal infrared images to be reconstructed are obtained in the flight test over Zhoushan. The thermal infrared camera used is designed and equipped independently. The thermal infrared images are reconstructed by using the iterative back-projecting algorithm and the Projection onto Convex Sets Approach algorithm respectively. The experimental results show that both algorithms can improve the spatial resolution of thermal infrared images effectively.

Key words: super-resolution reconstruction; thermal infrared image; Projection onto Convex Sets Approach algorithm; iterative back-projecting algorithm

收稿日期: 2016-04-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 项目 (2012AA121102)

作者简介: 曹嘉豪 (1991-), 男, 江苏南通人, 硕士生, 主要从事热红外成像方面的研究。

E-mail: caojh@shanghaitech.edu.cn

0 引言

对于自然界中的一切物体,只要温度高于绝对零度,都会产生红外辐射。作为热辐射成像的结果,热红外图像是随着红外成像技术的出现而诞生的。红外成像系统的主要工作波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 。这两个波段被称为红外窗口。红外图像的获取不依赖于外部光线,所以与可见光图像相比,红外图像具有温度灵敏度高、探测能力强、作用距离远、可全天候工作等优点。目前,红外热像仪在医疗、治安、消防、考古、交通、农业和地质等许多领域均有重要应用。

高空间分辨率的热红外图像能够提供更多关于目标场景的细节信息,因而在计算机视觉、医学和遥感等诸多领域有着广泛的应用需求。要提高热红外图像的空间分辨率,最简单直接的方法就是提高热红外成像系统的硬件性能。然而这种方法代价昂贵,同时也受到传统工艺等因素的制约。因此,如何在现有的硬件水平下提高热红外图像的空间分辨率成为亟需解决的一个问题。图像超分辨率技术便在此背景下应运而生。

从本质上来说,提高图像的空间分辨率就是要增加图像所承载的信息量。图像复原技术是针对单帧图像进行处理,并试图恢复一幅被模糊或者被噪声破坏的图像的。但由于单帧图像本身所承载的信息量有限,要得到更多的信息只能对有限的信息进行延拓或者对其外延信息进行估计,所以图像复原技术在很大程度上还得依靠主观推测,因而并不能取得很好的效果。图像超分辨率重建技术尝试利用多帧退化的低分辨率观测图像来构造出一幅或多幅高分辨率图像。这种方法的核心思想是用时间带宽换取空间分辨率,即利用针对同一地物目标获取的多幅图像之间的互补信息和针对地物目标的先验知识,恢复出图像获取过程中所丢失的高频信息,从而实现图像空间分辨率的提升。该方法的超分辨率重建能力优于单帧的图像复

原。1984 年, Tsai R Y 等人提出利用针对同一地物获取的序列多帧图像来重建高分辨率图像^[1],并在试验中取得了不错的效果。1995 年, Hunt B R^[2]从理论上对超分辨率重建进行了分析并证明了其可行性。与此同时,利用序列图像进行超分辨率重建也成为了人们研究的热点。

随着超分辨率重建技术研究的不断深入,多种重建方法被相继提出。综合说来,根据处理域的不同,基于多帧图像的超分辨率重建技术可以分为频域方法和空域方法两大类。其中,频域方法是指在频率域内通过消除频谱的混叠来提高图像质量。该方法具有理论简单、运算简便以及易于实现并行处理等优点,但也存在一定的局限性,即只能处理全局平移和线性空间不变的观察模型,所包含的空域先验知识有限。频域方法已不是当前研究的主流。相对而言,空域内的超分辨率重建方法的观察模型具有很广的涉及面,涵盖图像的全局运动、光学模糊、点扩散函数估计和帧内模糊运动等内容。因此,基于空间域的超分辨率重建算法具有更好的灵活性和更广的适用范围,其代表主要包括迭代反投影法^[3]、凸集投影法^[4]、最大后验概率估计法^[5]以及维纳滤波等。

本文对舟山航拍所获取的热红外图像进行超分辨率重建,即分别运用频域内常见的凸集投影法和迭代反投影法对获取的序列热红外图像进行超分辨率重建,并对重建结果进行对比分析。主要内容如下:第一节介绍凸集投影法;第二节介绍迭代反投影法;第三节对航拍所用的热红外相机及飞行参数进行简要介绍;第四节对这两种超分辨率重建算法的实验结果进行对比分析;最后对整个工作进行总结。

1 凸集投影法

从本质上来说,凸集投影法是一种基于集合论的方法^[4],即对超分辨率图像重建的解空间和凸集集合进行交叉投影。这些凸集约束具有正定性、平滑性和数据可靠性等特性。这些特性也正对应于序列低分辨率图像的数据分布、噪声和降质模型等先验知识。而凸集投影法正是这些约束集合的交集所构成的解空间。通过

迭代的方式将超分辨率重建估计投影到解空间中, 最终可以得到一个可行解。

假设初始图像 $f(x, y)$ 为希尔伯特空间 H 中的一个元素, 图像 f 是未知的, f 中的每个已知特性都将图像 f 限制在 H 的一个凸集中。该凸集也就是约束凸集。在空间 H 中任意选取一点 $f^{(0)}$, 然后采用迭代的方式不断向凸集中投影。投影时确保下一点 $f^{(1)}$ 仍能满足约束凸集的要求, 然后依次对 $f^{(n)}$ 投影。可用式 (1) 表示上述投影过程:

$$p_i f = f_i \quad (1)$$

式中, p_i 为投影算子。通过不断迭代的过程直至解收敛, 最终得到的解即为超分辨率重建的结果。

2 迭代反投影法

迭代反投影法的核心思想是, 在迭代的过程中逐步缩小实际获取的低分辨率图像与对图像进行降质后所获取的模拟低分辨率图像之间的误差, 然后通过反向投影的方式将两者间的误差更新到高分辨率图像的估值中, 从而重建出高分辨率影像^[6]。在这种方法中, 首先粗略

预估出一幅高分辨率图像 $f^{(0)}$, 此时通常采用单幅低分辨率图像的插值结果; 然后根据退化模型从 $f^{(0)}$ 中衍生出一系列模拟的低分辨率图像 $\{g_k^0\}$ 。如果 $f^{(0)}$ 等于实际的高分辨率图像, 那么模拟的低分辨率图像 $\{g_k^0\}$ 便等同于原始观测的实际低分辨率图像 $\{g_k\}$; 否则, 就根据 $\{g_k - g_k^0\}$ 的差值将 $f^{(0)}$ 更新于 $f^{(1)}$; 重复上述过程, 直至模拟的低分辨率图像与原始观测图像之间的最小误差达到设定阈值为止。采用迭代反投影法估计高分辨率图像的公式可表示为

$$f^{n+1} = f^n + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K T_k^{-1} \{[(g_k - g_k^n) \uparrow s] * h^{BP}\} \quad (2)$$

式中, $\uparrow s$ 表示增采样 s 倍; T^k 为从 f 到 g_k 的两维变换函数; $*$ 为卷积运算符; h^{BP} 为反投影核, 它决定了 $g_k - g_k^n$ 对 f^{n+1} 的影响方式。图 1 为迭代反投影法的流程图。

3 航拍的相关背景简介

图 2 所示为舟山航拍所用的自主设计搭载的热红外相机的外形及实验场景。

热红外相机采用法国 Sofradir 公司生产的探测器, 其焦平面尺寸为 320×256 。该相机配有焦

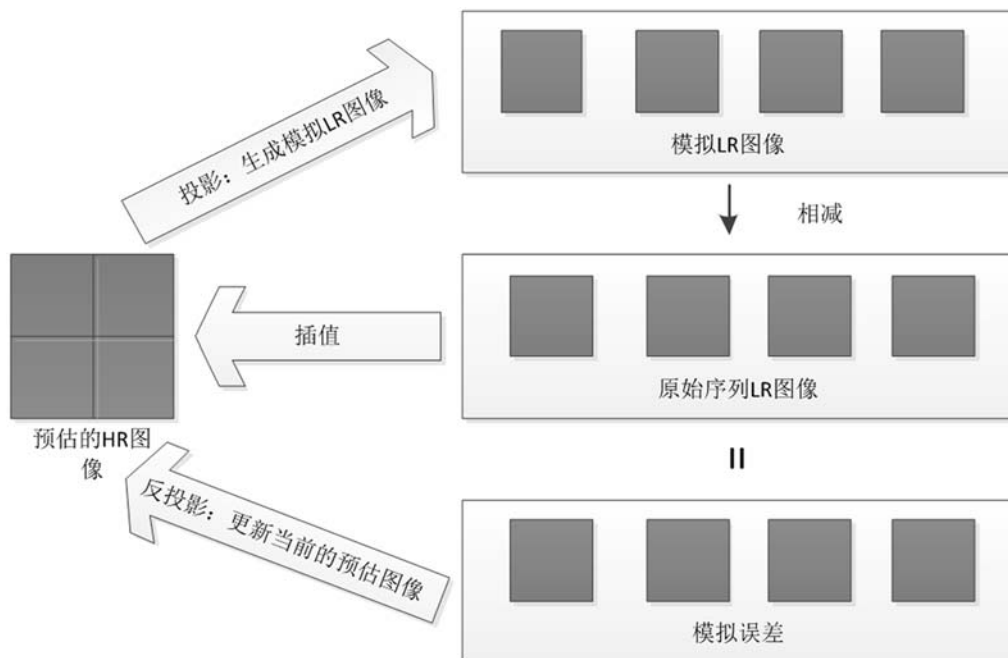
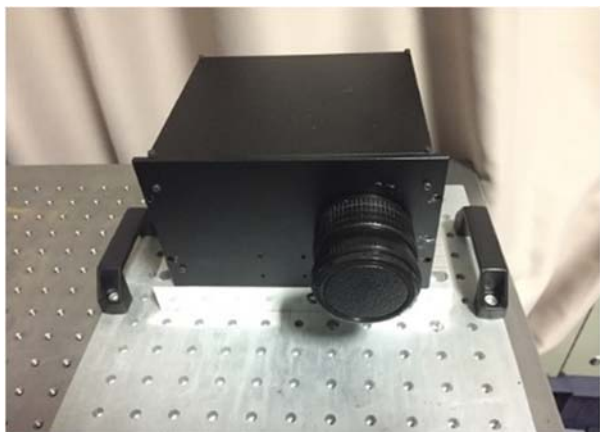


图 1 迭代反投影法的流程图

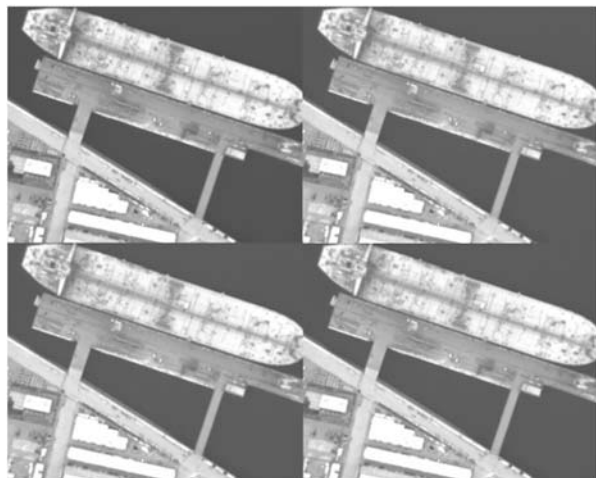


(a)



(b)

图 2 (a) 自主设计搭载的热红外相机; (b) 在飞行实验中, 热红外相机搭载在运动平台上



(a)



(b)

图 3 (a) 通过航拍获得的 4 幅连续帧的热红外图像; (b) 对左上角的单帧图像插值 2 倍后获得的图像

表 1 飞行参数

参数	数值
高度	2000 m
速高比	0.02 ~ 0.04
帧频	100 Hz
光谱范围	8 ~ 11.5 μm
图像格式	原始图像为 $320 \times 256 \times N$, 其中 N 为采集的帧数

距为 60 mm 的镜头, 其对地分辨率约为 1 m。表 1 列出了飞行实验的相关参数。

4 两种方法的对比分析

为了比较本文所介绍的两种超分辨率重建算法的实际效果, 我们分别采用这两种算法对舟

山航拍所获得的热红外序列图像进行了处理。将航拍获得的热红外序列图像选为原始观测的低分辨率图像, 然后对其进行超分辨率重建, 最终生成了高分辨率图像。通过对重建后的效果进行对比分析, 验证了这两种算法的有效性。

实验选取图 3(a) 所示的 4 幅连续帧图像作为初始观测的低分辨率图像 g_k^0 , 图像大小为 320×256 。

在对所选的热红外图像进行超分辨率重建之前, 先要对序列图像进行图像配准。基于序列图像的超分辨率重建技术是建立在低分辨率序列图像之间存在差异化的基础上, 并以此来提高图像空间分辨率的。这项技术的实现有一个先决条件, 即序列图像除了重合部分之外还应

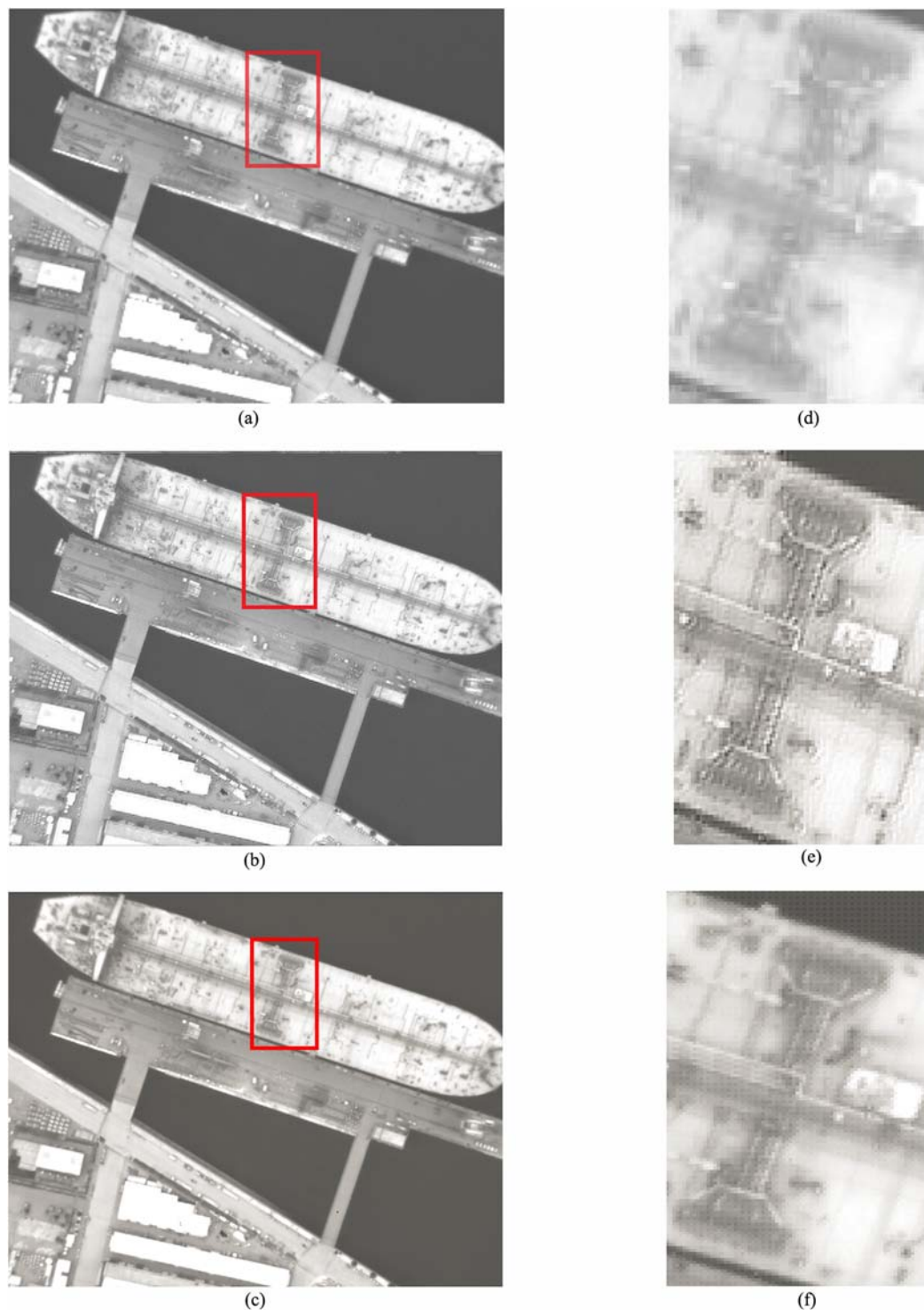


图 4 (a) 对初始观测的低分辨率图像 g_k^0 进行插值后得到的图像; (b) 采用迭代反投影法对初始观测的序列图像进行重建后得到的图像; (c) 采用凸集投影法对初始观测的序列图像进行重建后得到的图像; (d) ~ (f) 以上三幅图像中所选细节放大后的图像

存在位移, 这样才能使得在同一场景下获取的序列帧图像之间存在稍许差异, 从而获取序列图像之间互补的非混叠信息。

我们选用基于空间域的 Keren 图像配准算法来对图像进行配准^[7]。从原理上来说, 该算法是一种基于图像的运动模型。通过泰勒展开

的数学方法, 在其后运用求导的方式取得配准方程的解, 然后再对求得的解进行迭代以获得更为精确的位移值。因此, Keren 图像配准算法具有较好的鲁棒性。

以首幅图像作为参考图像, 利用 Keren 图像配准算法求出其余三幅图像相对于参考图像的位移。针对参考图像, 采取双三次插值的方式使其大小在 X 和 Y 方向上均扩大 2 倍, 如图 3(b) 所示。然后将获取的位移信息分别与上文介绍的两种超分辨率重建算法相结合, 以实现有序列图像的超分辨率重建。图 4 所示为重建后得到的结果。

从图 4(d) ~ 图 4(f) 中可以看出, 与直接插值后得到的图像相比, 经过两种超分辨率重建算法处理后得到的图像在空间分辨率上都取得了很大改进。后者在细节部分得到了明显提升, 视觉效果更好, 边界纹理部分更加清晰。由此可见, 本文介绍的两种超分辨率算法均能有效提高航拍热红外图像的空间分辨率。若直接从视觉上比较两者的重建效果, 则可发现迭代反投影法的结果在地物边缘等区域可取得更好、更自然的视觉效果。

除了直观的视觉评判之外, 还可采用峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 对重建后的图像进行定量分析。PSNR 是应用最为广泛的一种用于评价图像空间分辨率的客观测量法, 其计算公式为

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \| I(i, j) - I'(i, j) \|^2 \quad (4)$$

式中, MAX_I 为图像像素点的最大值; 实验处理的是灰度图像, 此值为 255; I 和 I' 分别为原始高分辨率图像和重建高分辨率图像; M 和 N 表示图像大小。分别计算了经本文提出的两种算法重建后图像的 PSNR 数据 (结果见表 2)。

由表 2 可知, 在对航拍获取的热红外图像进行超分辨率重建时, 与凸集投影法相比, 迭代反

表 2 两种算法的 PSNR 数据

算法名称	PSNR (dB)
迭代反投影法	31.217
凸集投影法	25.034

投影法可以取得较好的实验效果, 其 PSNR 值也更高。

5 结束语

在通过热像仪航拍获取的热红外图像的基础上, 如何提高现有图像的空间分辨率是本文所要研究的主要问题。首先, 采用 Keren 位移估计算法得到了序列图像之间的位移值; 然后将位移信息与常见的两种超分辨率重建算法相结合, 实现了对序列图像的重建。结果表明, 这两种算法都能有效提高热红外图像的空间分辨率。通过对两者进行定量化的比较, 我们发现迭代反投影法能够取得更好的重建效果, 因此更适用于本次航拍获取的热红外序列图像的重建工作。

参考文献

- [1] Tsai R Y, Huang T S. Multi-Frame Image Restoration and Registration [C]. Greenwich: Processing on Advances in Computer Vision and Image, 1984: 317-339.
- [2] Hunt B R. Super-Resolution of Images: Algorithms, Principles, Performance [J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1995, 6(4): 297-304.
- [3] Irani M, Peleg S. Improving Resolution by Image Registration [J]. *CVGIP: Graph Models Image Process*, 1991, 53(3): 231-239.
- [4] Stark H, Oskoui P. High-Resolution Image Recovery from Image-Plane Arrays Using Convex Projections [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1989, 6(11): 1715-1726.
- [5] Lertrattanapanich S, Bose N K. High Resolution Image Formation from Low Resolution Frames Using Delaunay Triangulation [J]. *IEEE Trans ASSP*, 2002, 11(12): 1427-1441.
- [6] Qian S E, Chen G. Enhancing Spatial Resolution of Hyperspectral Imagery Using Sensor's Intrinsic Keystone Distortion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(12): 5033-5048.
- [7] 王正勇, 何小海, 吴晓红. 基于边缘特征和 Keren 算法的图像配准 [J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(33): 25-27.