

文章编号:1007-2780(2016)04-0415-06

基于区域选择的红外弱小目标 超分辨率复原算法

郭 萌,赵 岩*,王世刚,陈贺新
(吉林大学 通信工程学院,吉林 长春 130012)

摘要:红外成像技术以其诸多优点成为智能化光电探测方面的主流研究方向,然而,红外弱小目标图像却有细节特征少、信噪比低等特点,因此考虑到使用超分辨率复原算法对其进行复原,为图像提供更多的细节信息。本文分析了凸集投影法的基本原理,针对其运行时间长的特点,提出了改进算法。首先用直方图拟合的方法选择出目标区域,然后在目标区域内进行超分辨率复原,区域外使用双线性插值。最后对 3 组低分辨率图像,每组五帧,用该方法进行验证。从实验结果可以看出,计算速度分别提升了 15.6%、45.5%和 46.5%。因此,这种方法能够有效地缩短超分辨率复原算法的处理时间。

关 键 词:红外弱小目标;凸集投影法;区域选择

中图分类号:TP751.1;TN919.81 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163104.0415

Infrared dim-small target super-resolution restoration algorithm based on region selection

GUO Meng, ZHAO Yan*, WANG Shi-gang, CHEN He-xin

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The infrared imaging technology has become the main stream research direction of the intelligent photoelectrical detection due to its advantages. However, the image of infrared dim-small target has less details and low signal to noise ratio, so super-resolution restoration algorithm is used to provide more detail information. This paper analyzes the basic principles of POCS (Projection Onto Convex Sets), for its characteristics of long running time, an improved algorithm is proposed. First, we use histogram fitting to select the target area, then use super-resolution restoration in the target area and bilinear interpolation outside the region. Finally, three groups of low resolution images with five frames in each group are used to test the performance of the proposed method. As can be seen from the experimental results, the calculation speed of the proposed algorithm increased about 15.6%, 45.5% and 46.5% respectively. In conclusion, this method can effectively reduce the processing time of the super-resolution restoration algorithm.

Key words: infrared dim-small target; projection onto convex sets; region selection

收稿日期:2015-09-23; **修订日期:**2015-12-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61271315, No. 61171078)

Supported by National Natural Science and Foundation of China(No. 61271315, No. 61171078)

* 通信联系人, E-mail: zhao_y@jlu.edu.cn

1 引言

近年来,红外弱小目标检测已成为研究热点,尤其是在军事领域。很多欧美国家的武器系统,比如航空母舰的预警系统、各种飞机的红外搜索跟踪系统、红外成像制导系统等,都会涉及到红外弱小目标检测。但是由于探测距离远,目标在红外图像中只占有几十个甚至是十几个像素,没有形状及纹理信息。并且由于视场广、成像复杂,受到大气传输以及红外探测器灵敏度的制约,目标通常会淹没在红外图像的背景杂波中,给检测工作带来一定的困难。

超分辨率复原技术是利用多帧低分辨率图像之间的运动信息,还原出一帧高分辨率图像,为图像提供更多的目标信息,解决了红外成像系统的上述问题。因此,开展红外图像的超分辨率复原研究,对于提高军事防御系统的生存力有着重要意义。

超分辨率复原的问题由来已久,它最初是由 Huang 和 Tsay^[1]在 1984 年正式提出的,这种基于频率域的方法只适用于全局性平移运动的情况,难以增加一般性的先验约束条件。因此在随后的几十年中,基于空间域的超分辨率复原算法得到了广泛的研究。Schultz 等人^[2]提出基于贝叶斯框架的最大后验概率超分辨率复原算法。Irani 等人^[3]采用了迭代反向投影算法。覃凤清等人^[4]对迭代反投影法进行改进,提出了一种具有子像素级精度的图像配准方法,该方法使重建图像的峰值信噪比有了较大提升。石明珠等人^[5]用倒谱分析法对点扩散函数进行定量估计,然后采用耦合梯度保真项的改进型全变分图像复原算法对图像进行复原,较好的保持了图像的细节。1989 年,Stark 等人^[6]最早将凸集投影算法引入到超分辨率复原领域中。陈健^[7]和苏衡^[8]对近年来的超分辨率复原算法进行了细致的总结。贾苏娟等人^[9]提出的针对光照非均匀的彩色图像序列的超分辨率复原算法取得了良好的效果。王凤娇等人^[10]提出了基于尺度不变特征变换的超分辨率复原算法,它能够有效解决因运动估计不准而引起的重建图像效果不好的问题。徐美芳等

人^[11]使用梯度插值算法生成初始估计图像,然后对中心点为边缘像素的点扩散函数进行了修正,使复原后图像的峰值信噪比得到了明显改善。姚琦等人^[12]用表征图像相对清晰度的参数控制阈值,实现了阈值的动态选取,较好地提升了重建图像的清晰度及信噪比。

本文提出的基于区域选择的超分辨率复原算法,是在凸集投影算法基础上提出的改进算法。根据红外弱小目标的特点,将目标区域提取出来,在区域内集中进行复原,省去了应用于背景的大量运算。

2 POCS 算法的基本原理

凸集投影算法(Projection onto Convex Sets, POCS)是超分辨率复原算法中比较经典的一种算法,它的解空间中的可行解有多个限制条件,每一个限制条件都被定义为向量空间中的凸约束集。这些限制条件一般是超分辨率解比较理想的性质,例如图像正则化、数据可靠性和能量有界性等。超分辨率复原问题的解空间就定义为这些凸约束集的交集。具体做法是,首先在解空间中确定一点作为原始高分辨率图像的估计,然后通过反复的迭代计算来定位解空间中所有的收敛解,直至满足一定条件。

POCS 算法的公式如式(1)所示:

$$f_{i+1} = P_M \cdots P_j \cdots P_2 P_1 \{f_i\} = P f_i, \quad (1)$$

其中: P_j 表示 f_i 对应于第 j 个凸集的投影算子。

凸集的定义方法为:

$$C_{m_1, m_2, k} = \{\hat{x}(i_1, i_2) : |r_k(m_1, m_2)| \leq \delta_0\}, \quad (2)$$

$$r_k(m_1, m_2) = g_k(m_1, m_2) -$$

$$\sum_{i_1=0}^{M-1} \sum_{i_2=0}^{N-1} \hat{x}(i_1, i_2) h_k(m_1, m_2; i_1, i_2), \quad (3)$$

其中: $\hat{x}(i_1, i_2)$ 为理想高分辨率图像的估计, $h_k(m_1, m_2; i_1, i_2)$ 为观察图像在 (i_1, i_2) 处所对应的系统点扩散函数, δ_0 为 $\hat{x}(i_1, i_2)$ 在 $C_{m_1, m_2, k}$ 内的统计置信度, $r_k(m_1, m_2)$ 代表观测到的低分辨率图像与模拟低分辨率图像的残差, k 表示第 k 帧低分辨率图像。那么,对于理想高分辨率图像的估计 $\hat{x}(i_1, i_2)$, 其投影可以表示为:

$$P_{m_1, m_2} [\hat{x}(i_1, i_2)] = \hat{x}(i_1, i_2) + \begin{cases} \frac{r_k(m_1, m_2) - \delta_0}{\sum_{i_1} \sum_{i_2} h_k^2(m_1, m_2; i_1, i_2)} h_k(m_1, m_2; i_1, i_2) & \text{if } r_k(m_1, m_2) > \delta_0 \\ 0 & \text{if } -\delta_0 \leq r_k(m_1, m_2) \leq \delta_0 \\ \frac{r_k(m_1, m_2) + \delta_0}{\sum_{i_1} \sum_{i_2} h_k^2(m_1, m_2; i_1, i_2)} h_k(m_1, m_2; i_1, i_2) & \text{if } r_k(m_1, m_2) < -\delta_0 \end{cases}, \quad (4)$$

若加入一些额外的约束条件,例如幅度约束、能量约束等,可以进一步加快收敛速度,改善复原效果。

3 基于区域选择的 POCS 算法

POCS 算法是超分辨率复原中应用非常广泛的一种算法,但是该算法运算量大,处理时间较长,因此本文针对红外弱小目标图像提出了基于区域选择的快速 POCS 超分辨率复原算法。对于红外弱小目标图像,大部分是简单的背景,不是我们关注的部分,可以不做复原处理,直接通过双线性插值得到,需要进行复原处理的部分只是弱小目标所在的区域。

要想仅在目标区域进行超分辨率复原,首先需要确定图像的目标区域,由于弱小目标占有的像素点很少,其余是大面积的背景噪声,图像的灰度直方图也不像普通图像那样呈现双峰,因此一般的阈值选择方法并不适用于本文的情况。考虑到弱小目标处理实时性的需要,本文提出了基于直方图拟合的阈值分割方法,来区分目标区域和背景区域。

基于区域选择的 POCS 算法的具体做法是,首先对图像进行维纳滤波,维纳滤波的目的是使滤波后图像与原始图像的均方误差最小,它能根据图像的局部方差调整滤波器的输出,对高斯噪声有良好的抑制效果,这样做可以使图像的目标部分得到一定程度的增强,以便于进一步的筛选。

对于目标区域的提取,由于呈现单峰的直方图,形状与高斯曲线比较吻合,因此考虑到用高斯曲线来拟合直方图。我们知道,高斯公式可以表示为:

$$y = a \times e^{-\frac{(x-b)^2}{c}}. \quad (5)$$

对于一个给定的直方图,高度 a 和均值 b 很容易得到,主要就是对方差 c 的估计,为了节省时间,拟合仅在单峰的右半部分进行。具体做法是先对直方图进行平滑处理,然后等间隔取 10~20 个采样点,代入高斯公式求出相应的方差,最后取它们的平均值作为对参数 c 的估计。拟合的结果如图 1 所示,其中,柱状图代表图像的灰度直方图,外侧的曲线代表高斯拟合曲线。然后将高斯曲线尾部曲率最大的位置对应的灰度值作为分割阈值。实验证明,此方法能够取得较好的分割效果。

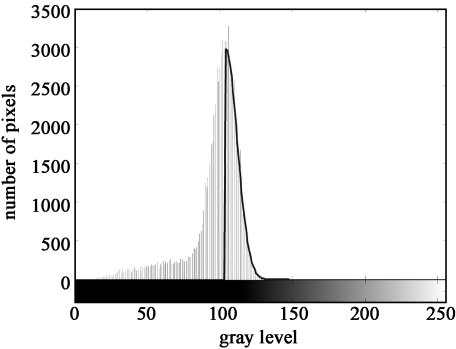


图 1 对图像灰度直方图进行高斯拟合
Fig.1 Gaussian fitting for image gray histogram

分割后得到的二值图像如图 2 所示,这种分割只是粗略的分割,其中的亮点为可能的目标点,将这些点用最小的外接矩形框起来就得到了目标区域。然后在区域内部进行超分辨率复原。

用 $\{Lp_1, Lp_2, \dots, Lp_n\}$ 表示低分辨率图像序列,对于序列中的每幅图像,取矩形区域内的目标图像生成新的小尺寸低分辨率序列 $\{Lp_1^i, Lp_2^i, \dots, Lp_n^i\}$ 。接着,对低分辨率序列 $\{Lp_1^i,$

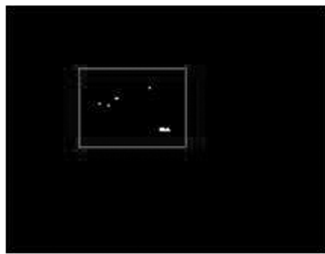


图 2 阈值分割与区域选择效果图

Fig. 2 Image segmentation and region selection

$Lp_2^s, \dots, Lp_n^s$, 取一帧 Lp_r^s 进行双线性插值作为参考帧 Hp_r^s 。对于其余帧, 需要与参考帧进行配准和迭代投影修正。最后, 得到目标区域的高分辨率图像 Hp^s 。将 Lp_r 进行双线性插值得到 Hp_r , 并将 Hp^s 叠加到 Hp_r 上, 即得到最终的高分辨率图像 Hp 。

算法的具体步骤如下:

- (1) 取序列中的第一帧图像, 用上述直方图拟合的方法来确定阈值。
- (2) 用得到的阈值对第一帧图像进行分割, 得到可能的目标点, 将这些点的最小外接矩形的内部区域称为目标区域。

(3) 对整个低分辨率图像序列取出目标区域对应的子图像序列, 作为新的低分辨率图像序列 $\{Lp_1^s, Lp_2^s, \dots, Lp_n^s\}$ 。对第一帧图像, 使用双线性插值法构造高分辨率图像的初始估计。

(4) 计算第一帧低分辨率图像与其他几帧低分辨率图像的相对运动参数。

(5) 根据投影算子将低分辨率图像映射到高分辨率网格上, 进行灰度修正。

(6) 判断是否满足迭代退出条件, 满足则执行步骤(7), 否则返回步骤(5)。

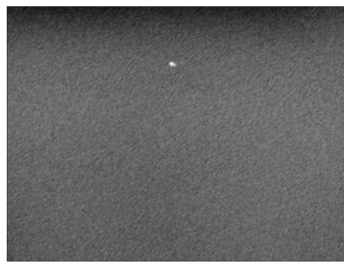
(7) 将复原后的高分辨率的目标区域 Hp^s 叠加到双线性插值构造的大尺寸高分辨率图像 Hp_r 中, 得到最终的高分辨率图像 Hp 。

4 实验结果与分析

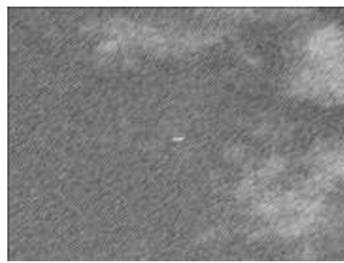
根据上述改进的 POCS 算法, 选用 3 组不同背景的低分辨率图像序列作为实验对象进行测试。每组五帧图像, 第一、三组图像大小为 180×140 , 第二组图像大小为 320×280 , 每组的第一帧图像如图 3 所示, 用本文的算法复原得到的高分辨率图像如图 4 所示。图示的尺寸并非实际大小。



(a) 第一组第一帧
(a) The first frame of the first group



(b) 第二组第一帧
(b) The first frame of the second group



(c) 第三组第一帧
(c) The first frame of the third group

图 3 每组测试图像的第一帧图像
Fig. 3 First frame of each group



(a) 第一组的复原图像
(a) Restored image of the first group



(b) 第二组的复原图像
(b) Restored image of the second group



(c) 第三组的复原图像
(c) Restored image of the third group

图 4 每组图像的复原后的高分辨率图像
Fig. 4 High resolution images after restored of each group

将本文算法与双线性插值和传统 POCS 算法的复原结果作对比,由于原始的高分辨率图像无法得到,同时考虑到红外弱小目标图像的

特殊性,因此采用图像的清晰度来表征复原效果。清晰度公式如式(6)所示。其中: $f(i,j)$ 是指图像在 (i,j) 处的像素值, M 和 N 分别为图像

$$d=\frac{\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{N-1}\sqrt{\{[f(i,j)-f(i+1,j)]^2+[f(i,j)-f(i,j+1)]^2\}/2}}{(M-1)\times(N-1)},$$

(6)

的行数和列数。

3 种复原算法在整幅图像与在目标区域的清晰度评价结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 对整幅图像使用三种复原算法的清晰度评价结果

Tab.1 Quality evaluation of three kinds of restoration algorithm for the whole image

复原方法	双线性 插值算法	传统 POCS 算法	改进 POCS 算法
第一组	0.014 2	0.025 8	0.015 5
第二组	0.013 1	0.026 4	0.014 3
第三组	0.014 5	0.022 9	0.018 8

表 2 对目标区域使用三种复原算法的清晰度评价结果

Tab.2 Quality evaluation of three kinds of restoration algorithm for target region

复原方法	双线性 插值算法	传统 POCS 算法	改进 POCS 算法
第一组	0.013 8	0.025 2	0.025 1
第二组	0.013 3	0.026 5	0.021 5
第三组	0.013 8	0.022 0	0.025 3

从表 1 的数据可以看出,对于全局图像来说,使用改进的 POCS 算法得到的图像质量优于双线性插值算法,但是不及传统 POCS 复原算法。这是因为本文的方法仅对目标区域进行复原,区域外的大面积背景仅做简单的插值处理,所以从整体来看不及 POCS 算法,但就目标区域来说,本算法与传统 POCS 算法是等同的,即目标得到了同等程度的增强,表 2 的数据正是说明了这一点,而目标区域以外是我们不关心的部分,因此本文的算法也具有良好的复原效果。

本文改进的 POCS 算法的优势在于节省了处

理时间,表 3 对传统 POCS 算法与改进的 POCS 算法的运行时间进行了对比。

表 3 传统 POCS 算法与改进 POCS 算法的运行时间
(单位:秒)

Tab.3 Elapsed time of traditional POCS and improved POCS (Unit:s)

复原方法	传统 POCS 算法	改进 POCS 算法
第一组	2.550	2.153
第二组	5.467	2.979
第三组	4.153	2.220

从表 3 的数据可以看出,改进的 POCS 算法能够明显地缩短运行时间,达到了预期的效果。

综合以上 3 组图片的实验结果可以看出,对于天空背景下无云及薄云的弱小目标图片,改进的 POCS 算法都能取得良好的效果。

5 结 论

传统的 POCS 算法运算量大,运行时间较长。本文提出的基于区域选择的 POCS 算法,通过对直方图拟合的方式求出阈值进而得到目标区域,然后对区域内部用 POCS 复原算法,由于区域外是大面积的背景噪声,可以不做复原处理,直接使用简单的双线性插值算法。从 3 组实验结果可以看出,计算速度分别提升了 15.6%、45.5%和 46.5%。因此,该方法可以有效减少运行时间,提高图片的处理效率。由于本算法未对背景区域进行超分辨率复原处理,也就是用背景区域的分辨率来换取时间效率,但是这种做法不会影响目标部分的复原质量。

参 考 文 献:

- [1] TSAI R Y, HUANG T S. Multi-frame image restoration and registration[J]. *Advances in Computer Vision and Image Processing*, 1984, 1(2): 317-339.
- [2] SCHULTZ R R, STEVENSON R L. Improved definition video frame enhancement[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Detroit, MI: IEEE, 1995, 4: 2169-2172.
- [3] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration[J]. *CVGIP: Graphics Models and Image Processing*, 1991, 53(3): 231-239.
- [4] 覃凤清,何小海,陈为龙,等. 一种图像配准的超分辨率重建[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 409-416.
QIN F Q, HE X H, CHEN W L, *et al.* Super-resolution reconstruction method of image registration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 409-416. (in Chinese)
- [5] 石明珠,许廷发,张坤. 运动成像混合模糊的全变分图像复原[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1973-1981.
SHI M Z, XU T F, ZHANG K. Total variation image restoration for mixed blur in moving image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1973-1981. (in Chinese)
- [6] STARK H, OSKOU 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.
- [7] 陈健,高慧斌,王伟国,等. 超分辨率复原方法相关原理研究[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 897-910.
CHEN J, GAO H B, WANG W G, *et al.* Correlation theory of super-resolution restoration method[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 897-910. (in Chinese)
- [8] 苏衡,周杰,张志浩. 超分辨率图像重建方法综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1202-1213.
SU H, ZHOU J, ZHANG Z H. Survey of super-resolution image reconstruction methods[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1202-1213. (in Chinese)
- [9] 贾苏娟,韩广良,陈小林,等. 光度非均匀彩色序列图像超分辨率重建[J]. 液晶与显示, 2014, 29(1): 106-113.
JIA S J, HAN G L, CHEN X L, *et al.* Super-resolution reconstruction with photometric change of color image sequence[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(1): 106-113. (in Chinese)
- [10] 王凤娇,陈光化,周文. 基于 SIFT 的 POCS 图像超分辨率重建[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(11): 39-42, 46.
WANG F J, CHEN G H, ZHOU W. Multi-frame image super-resolution reconstruction based on SIFT[J]. *Computer Technology and Development*, 2014, 24(11): 39-42, 46. (in Chinese)
- [11] 徐美芳,刘晶红. 基于边缘保持的航拍图像凸集投影超分辨率重建算法[J]. 液晶与显示, 2010, 25(6): 873-878.
XU M F, LIU J H. Super-resolution image reconstruction of aerial photography based on projection onto convex sets[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 873-878. (in Chinese)
- [12] 姚琦,沈松,朱飞. 基于加权 POCS 的图像超分辨率重建[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 264-266, 271.
YAO Q, SHEN S, ZHU F. Image super-resolution reconstruction based on weighted POCS[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(3): 264-266, 271. (in Chinese)

作者简介:郭萌(1989—),女,吉林长春人,硕士,主要从事图像超分辨率复原算法研究。E-mail: guomeng1628@163.com

赵岩(1971—),女,吉林省辽源市人,教授,博士生导师,主要从事视频图像处理研究。E-mail: zhao_y@jlu.edu.cn