

微扫描红外成像超分辨重建

王新华^{1,2}, 欧阳继红¹, 张 广², 何 阳²

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

摘 要: 为了通过低分辨率红外探测器获取高质量的图像信息, 对基于微扫描成像的序列图像获取方法和超分辨图像重建算法进行了研究。首先, 阐述了微扫描红外成像系统工作模式和软硬件构成。然后, 提出了一种基于电机驱动的光学微扫描序列图像获取方法。最后, 提出了一种基于字典学习的凸集投影算法用于超分辨图像重建。采用数值仿真和实际拍摄两种方式来验证本文算法的有效性, 结果均表明本文方法能够有效地重建图像边缘细节并对噪声有较好的抑制作用。

关键词: 计算机应用; 微扫描; 凸集投影; 超分辨图像重建

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2017)01-0235-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201701034

Super-resolution reconstruction of infrared images based on micro-scanner

WANG Xin-hua^{1,2}, OUYANG Ji-hong¹, ZHANG Guang², HE Yang²

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to acquire high quality image information through infrared detector with low resolution, a method for acquiring image sequence through a Micro-scanner Imaging (MSI) system and Super-resolution Image Reconstruction (SRIR) algorithm was investigated. First, the working mode, hardware and software composition of the MSI system were elaborated. Then, the method for acquiring the image sequence from the MSI system based on motor drive was extracted. Finally, an algorithm of Projections onto Convex Sets (POCS) based on dictionary learning was presented, which was used for SRIR. To validate the proposed method, low resolution image sequence was acquired from digital simulation and real shooting. Experimental results indicate that the proposed method could effectively restore the edge information of an image and suppress noise.

Key words: computer application; micro-scanner; projections onto convex sets (POCS); super-resolution image reconstruction (SRIR)

收稿日期: 2015-11-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170092); 吉林省科技发展计划项目(20160209006GX).

作者简介: 王新华(1984-), 男, 助理研究员, 博士研究生. 研究方向: 计算光学成像技术. E-mail: xinhua@jljlu.edu.cn

通信作者: 欧阳继红(1964-), 女, 教授, 博士生导师. 研究方向: 空间推理与数据挖掘. E-mail: ouyj@jljlu.edu.cn

决定红外成像系统分辨率的核心器件是焦平面探测器,但由于其制造工艺异常复杂,从硬件角度想提高探测器空间分辨率难度极大,通过微扫描成像技术可以在不增加探测器像素尺寸和规模的条件下明显提高成像系统的分辨率^[1]。目前,大多采用空域法用于实现微扫描序列图像的超分辨率重建,该方法基于线性观测模型,与频域法相比更易于引入问题的先验信息,且重建效果更好^[2]。比较典型的方法包括凸集投影(POCS)法^[3-5]、迭代反投影法(IBP)^[6-8]和最大后验概率(MAP)法等^[9-12]。

本文针对传统红外成像系统分辨率低且容易受噪声干扰等问题,通过微扫描成像方式获取低分辨率图像序列,采用基于字典学习的 POCS 算法重建序列图像分辨率。该方法可以明显提升传统红外成像系统的分辨率,还能明显改善图像边缘质量,并对噪声有较好的抑制作用。

1 红外微扫描超分辨成像原理

红外微扫描成像技术在不增加探测器像素尺寸和规模的条件下,通过增大成像系统的空间采样频率减少了图像的频率混叠效应,从而提高成像系统的分辨力,该技术就是从多幅相互之间有微小位移的时间序列低分辨率图像重建出高分辨率图像。

1.1 微扫描成像系统的工作模式

红外微扫描成像技术通过对同一场景进行多次采样,从多幅相互之间有亚像素位移的时间序列低分辨率图像复原重建出高分辨率图像。红外微扫描成像系统主要采取 1×1 、 2×2 和 3×3 这三种工作模式^[13],如图 1 所示。微扫描模式决定了探测器上图像的位移周期和微扫描轨迹。每种微扫描模式都有不同的扫描轨迹以及扫描步数,随着微扫描步数的增加,微扫描系统的空间分辨力也会随之提高。

采用数值分析方法可以分析微扫描模式与调制传递函数(MTF)之间的关系,从而得到微扫描

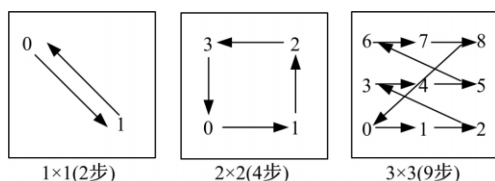


图 1 微扫描成像系统工作模式

Fig. 1 Working mode of micro-scanner imaging system

成像质量评价结果。

1.2 微扫描成像系统软硬件构成

实际红外微扫描超分辨成像系统涉及光、机、电、算、软等部分组成,其系统组成如图 2 所示。

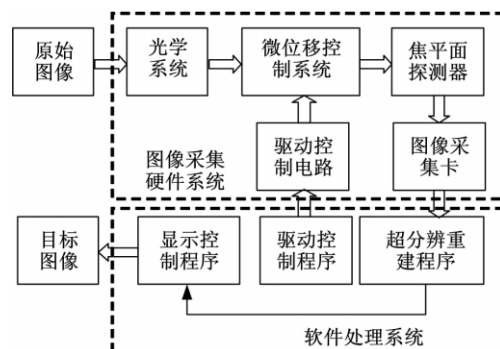


图 2 微扫描超分辨成像系统构成

Fig. 2 Architecture of micro-scanner imaging system

从图 2 可知,微扫描超分辨成像系统主要由图像采集硬件系统和软件处理系统两部分构成。本文主要描述微扫描超分辨成像硬件部分微位移序列图像获取方法和软件部分超分辨率图像重建算法。

2 微扫描序列图像获取方法

2.1 光学微扫描图像获取方法

红外微扫描成像系统的光学微位移机构可实现相对于成像器件焦平面探测器的微位移。现有的光学微扫描实现方式归结起来主要分为机械平移法、平板旋转法和摆镜法。其中机械平移透镜主要采用压电陶瓷驱动和电机驱动的方式。机械平移透镜微扫描原理如图 3 所示。

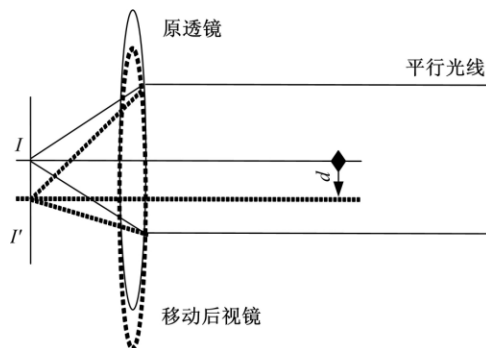


图 3 机械平移透镜微扫描原理

Fig. 3 Principle of micro-scanner based on mechanics translation lens

由于透镜的离轴位移量很小,因此产生的像差很小并且无像旋。此外,微扫描透镜和二轴微扫描位移台的质量可能会对系统性能产生影响,

设计质量轻的单片透镜作为微扫描透镜是解决该问题的办法之一。

2.2 红外微扫描光学系统设计

由于需要精确移动的微位移很小(亚像素),其微扫描幅度为 μm 级,小于对应探测器的探测元间距,需要很高的精度,主要有两个方面的难点^[14,15]:需要保证将图像从一个位置移到下一个位置时间上的精确性和微位移自身的精确性。

通过采用数值分析方法分析得到微扫描模式与调制传递函数(MTF)之间的关系,发现 2×2 微扫描模式对 MTF 的贡献率最大,实用价值最高,故通过电机驱动在 2×2 模式下每次移动半个像元。其中,探测器有效像素为 320×256 ,像元间距离为 $30 \mu\text{m}$,像面大小为 $9.6 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ 。

红外微扫描光学系统设计结构如图 4 所示,其中总长为 391 mm , F 数 $=2$,焦距 $f=240 \text{ mm}$;第 6 片透镜偏心扫描,幅度为 $25 \mu\text{m}$,质量约为 9.66 g 。因为要旋转微位移驱动控制器,前、后空间分别为 22 mm 和 30 mm 。

利用光学设计软件 CODE V 对微扫描光学子系统的 MTF 进行评价,结果如图 5 所示。

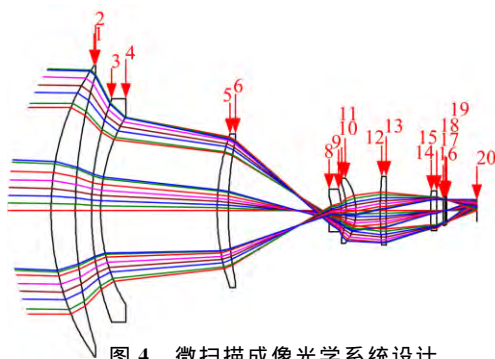


图 4 微扫描成像光学系统设计

Fig. 4 Optical system design of micro-scanner imaging

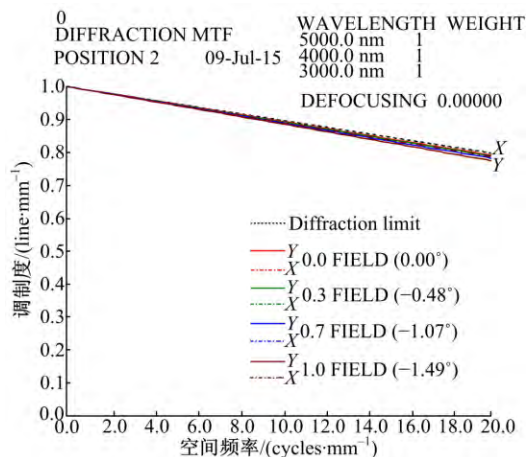


图 5 微扫描成像光学系统 MTF

Fig. 5 MTF of micro-scanner imaging system

此外,选取像方不同视场下的 121 个位置,通过计算扫描幅值均控制在半个像元(即 $15 \mu\text{m}$)以内,幅值变化情况如图 6 所示。

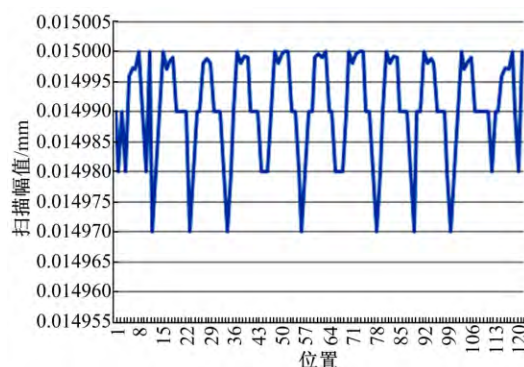


图 6 不同视场成像位置扫描幅值

Fig. 6 Scan amplitude of image space of different field

3 微扫描成像超分辨重建算法

3.1 图像退化观测模型构建

如果低分辨率图像序列间存在亚像素位移关系,并能够确定或估计低分辨率序列图像与重建后的高分辨率图像之间的关系,就可以建立观测模式进行超分辨重建^[16]。光电成像系统实际成像时由于受像差、衍射极限等因素的影响造成图像的退化,整个退化模型的构建如图 7 所示^[17]。

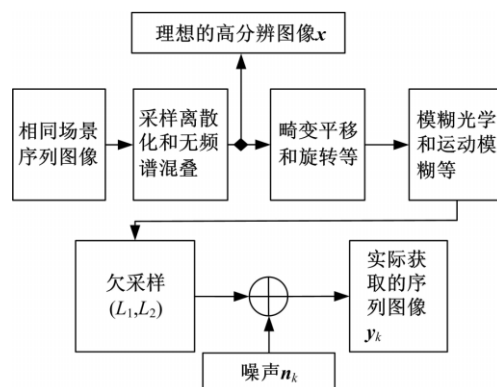


图 7 图像退化模型的构建

Fig. 7 Construction of image deterioration model

在图 7 中,假设理想目标高分辨率图像的大小为 $N = L_1 N_1 \times L_2 N_2$,每幅低分辨率图像的大小为 $M = N_1 \times N_2$,其中 L_1 和 L_2 表示观测模型中水平方向和垂直方向的欠采样算子,则在高于奈奎斯特频率处从一连续带宽限制信号里采样得到的理想非退化图像的向量表示形式为 $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$,第 k 幅低分辨率图像的向量表示形式为 $y_k = [y_{k,1}, y_{k,2}, \dots, y_{k,M}]^T$,这里 $k \in [1, P]$,图像退化模型经空间域离散化后,对于同一场景

下的 k 幅序列低分辨率图像,可由一幅高分辨图像经过几何形变、模糊、欠采样和噪声等一系列的降质或者退化过程产生,这样可以用如下表达式表述观测模型:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{DB}_k \mathbf{M}_k \mathbf{x} + \mathbf{n}_k, 1 \leq k \leq p \quad (1)$$

式中: \mathbf{M}_k 表示大小为 $L_1 N_1 L_2 N_2 \times L_1 N_1 L_2 N_2$ 的畸变矩阵; \mathbf{B}_k 表示大小为 $L_1 N_1 L_2 N_2 \times L_1 N_1 L_2 N_2$ 的模糊矩阵; \mathbf{n}_k 表示图像噪声。

3.2 POCS 算法实例化观测模型

POCS 算法是目前超分辨率复原重建中应用最为广泛的算法之一,该算法基于集合理论。采用 POCS 方法进行图像的超分辨重建需要解决 3 个问题:把关于解的若干限制条件解释为包含解的凸集 C_i ; 确定每个凸集的投影算子 P_i ; 为投影算子选择合适的松弛参数 λ_i 进行迭代投影。

首先,设待复原重建的高分辨率图像 f 是 Hilbert 空间 H 中的一个元素,对于 m 个已知的约束信息,就存在 m 个对应的闭凸集 C_i ,其中 $i \in [1, m]$,所求的 f 需要满足以下条件:

$$f \in C_0 = \bigcap_{i=1}^m C_i \quad (2)$$

然后,把 P_0 个 P_i 标记为投影算子分别投影到凸集 C_0 和 C_i ,封闭的凸集与它们各自的投影算子 P_i 产生投影序列如下:

$$f^{(k+1)} = P_m P_{m-1} \cdots P_1 f^{(k)}, k \in [1, m] \quad (3)$$

最后,为了加速算法的收敛速度,引入松弛算子 λ_i 将式(3)表述为以下形式:

$$f^{(k+1)} = T_m T_{m-1} \cdots T_1 f^{(k)}, k \in [1, m] \quad (4)$$

式中:

$$T_i = (1 - \lambda_i)I + \lambda_i P_i \quad (5)$$

$$i \in [1, m], 0 < \lambda < 2$$

利用 POCS 算法将式(1)实例化为如下形式:

$$g_l(m_1, m_2) = \sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2) h_l(m_1, m_2; n_1, n_2) + \eta_l(m_1, m_2) \quad (6)$$

式中: $g_l(m_1, m_2)$ 表示第 l 帧低分辨率图像; $f(n_1, n_2)$ 表示原始高分辨率图像; $h_l(m_1, m_2; n_1, n_2)$ 表示第 l 帧图像的 PSF; $\eta_l(m_1, m_2)$ 表示第 l 帧图像的噪声。

利用微扫描多帧序列低分辨率图像重建高分辨图像,可以定义数据一致性约束集合如下:

$$C_{m_1, m_2, l} = \{f(n_1, n_2, k) : |r^{(f)}(m_1, m_2, l)| \leq \delta_0(m_1, m_2, l)\} \quad (7)$$

式中:

$$r^{(f)}(m_1, m_2, l) \triangleq g(m_1, m_2, l) - \sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2) h_l(m_1, m_2; n_1, n_2) \quad (8)$$

$r^{(f)}(m_1, m_2, l)$ 代表和约束集合中任意一点 f 相关的残差; $\delta_0(m_1, m_2, l)$ 表示先验界限,代表统计置信水平。

高分辨率图像任意一点 $x(n_1, n_2, k)$ 在集合 $C_{m_1, m_2, l}$ 上投影 $p_{m_1, m_2, l}[x(n_1, n_2, k)]$ 定义为式(9):

$$p_{m_1, m_2, l}[x(n_1, n_2, k)] = \begin{cases} x(n_1, n_2, k) + [r^{(x)}(m_1, m_2, l) - \delta_0(m_1, m_2, l)] \times \\ \left[\sum_{x_1} \sum_{y_1} h_2(m_1, m_2; x_1, y_1) \right]^{-1} \times \\ h(m_1, m_2; n_1, n_2, l), r^{(x)}(m_1, m_2, l) > \\ \delta_0(m_1, m_2, l) x(n_1, n_2, k), \\ -\delta_0(m_1, m_2, l) \leq \\ r^{(x)}(m_1, m_2, l) \leq \delta_0(m_1, m_2, l) \\ x(n_1, n_2, k) + [r^{(x)}(m_1, m_2, l) + \delta_0(m_1, m_2, l)] \times \\ \left[\sum_{x_1} \sum_{y_1} h_2(m_1, m_2; x_1, y_1) \right]^{-1} \times \\ h(m_1, m_2; n_1, n_2, l), \\ r^{(x)}(m_1, m_2, l) < -\delta_0(m_1, m_2, l) \end{cases} \quad (9)$$

基于 POCS 超分辨图像重建算法的流程为:

(1)对超分辨率图像进行预估计完成参考帧构造,利用式(9)投影算子重复进行投影迭代,就可以求解超分辨率图像的估计值。

(2)利用运动估计算法估计相对参考帧的运动补偿参数。

(3)对参考帧进行不断修正直到获得可以接受的重建结构,当达到最大迭代次数或者两次迭代之间的误差小于设定的阈值终止迭代,所得到的迭代解为 POCS 方法的最优估计解。

3.3 基于改进 POCS 的超分辨图像重建算法

为了最大限度地保留低分辨原始图像边缘细节信息,在降低噪声干扰的同时保留有价值的高频信号,提出一种改进的 POCS 复原重建算法。

算法具体步骤如下:

Step1 构造参考帧。输入第一幅待分辨率图像,利用双线性插值法构造一帧高分辨率图像 Ref。

Step2 设置初始参数。手动设置迭代次数 N ,初始值为 0。

Step3 运动参数估计。利用四参数仿射变换

模型(10)计算低分辨率序列图像间的运动参数。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k\cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & k\cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: (x', y') 和 (x, y) 表示图像像素点位置; k 表示图像缩放系数; α 表示图像旋转角度; d_1 表示水平位移; d_2 表示垂直位移。

Step4 投影和灰度修正。利用基于边缘检测的 PSF 算子修正参考帧的像素值。

Step4.1 利用 POCS 投影算子(9),通过 PSF 将低分辨率序列图像中像素点投影到参考帧上。

Step4.2 基于边缘检测的 PSF 算子(11),计算参考帧图像中像素点的灰度估计值。

$$\text{PSF} = \exp(-\lambda d) \text{PSF}_0 \quad (11)$$

式中: λ 表示约束正则化系数,可以用于调节 $\exp(-\lambda d)$ 的数值衰减速率; d 表示像素点到图像边缘的空间距离; $\text{PSF}_0 = \exp[-(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2/2]$ 。

Step4.3 与序列低分辨率图像中的相同区域位置的实际灰度值进行比较,若超出误差范围,则对参考帧像素点的灰度值进行修正。

Step5 判断是否满足迭代终止条件。若满足,则退出迭代步骤;否则返回 Step4。

Step6 采用基于 K-SVD 字典学习方法^[18]对 POCS 估计图像进行去噪声处理。

4 实验验证

4.1 实验测试环境

实验测试采用的操作系统为 Windows 7 旗舰版 64 位 SP1;处理器为 Intel Core i7-4790K @ 4.00 GHz 四核;内存为 16 GB (DDR3 1333 MHz);算法开发工具为 Matlab Primer R2015a。

4.2 实验测试方案及结果

仿真实验采用大小为 480×480 像素的原始高分辨图像,如图 8(a)所示。首先,经过加入随机噪声和模糊、降采样因子为 2 的处理,得到 4 幅 240×240 像素的低分辨率序列图像。低分辨率序列图像的位移差为 0.1,角度差为 0.005,以此来模拟附有噪声的低分辨率图像序列。然后,分别采用不同的算法进行序列图像的超分辨率重建,结果如图 8(b)(c)(d)(e)所示。

从图 8 可以看出,双线性插值法难以对图像噪声进行处理,一般 POCS 算法虽然对噪声有一定抑制作用但图像边缘处仍然有明显的梯度效

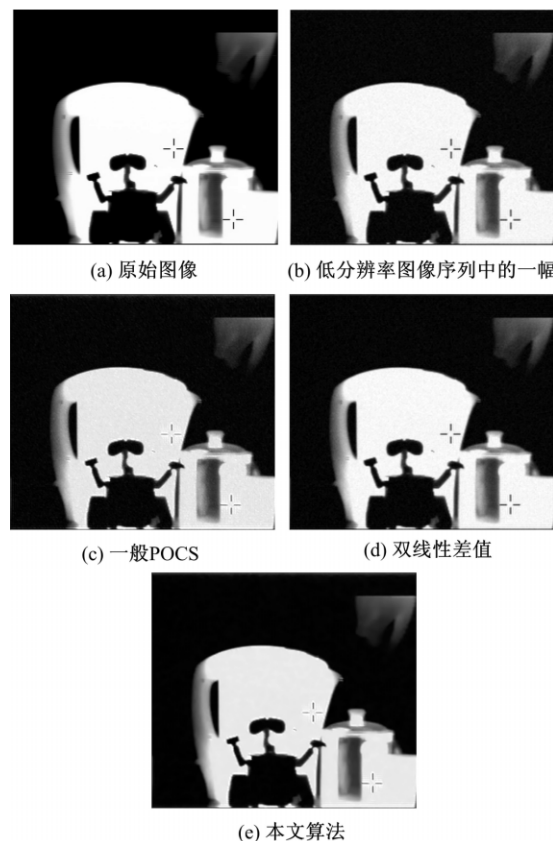


图 8 模拟图像退化 SRIR 实验结果

Fig. 8 SRIR experimental results of simulating of image deterioration process

应,本文算法对噪声有明显抑制作用并较好地复原出图像边缘细节信息。为了更客观地评价重建图像质量,采用 PSNR 和 SSIM 两个指标对不同算法的实验结果进行对比,如表 1 所示。

表 1 模拟图像退化过程 SRIR 实验数据对比

Table 1 Data comparison of SRIR based simulating

算法	PSNR	SSIM
双线性插值	24.6	0.7979
一般 POCS	21.7	0.8535
本文算法	21.9	0.9156

表 1 中结果表明:本文算法具有更好的图像重建效果。为了进一步验证算法在实际拍摄中能否取得较好的效果,采用非制冷红外成像仪在 2×2 微扫描工作模式下每次移动半个像元,采集获得原始、水平和垂直位置的 4 幅微位移低分辨率序列图像,图像大小为 320×256 像素。分别采用不同的重建算法对序列图像进行超分辨率重建,由于实际拍摄的图像没有理想高分辨率图像作参考,为了更直观地比较超分辨率重建结果,将图像放大 4 倍进行显示。从图 9 中可以看出,本文

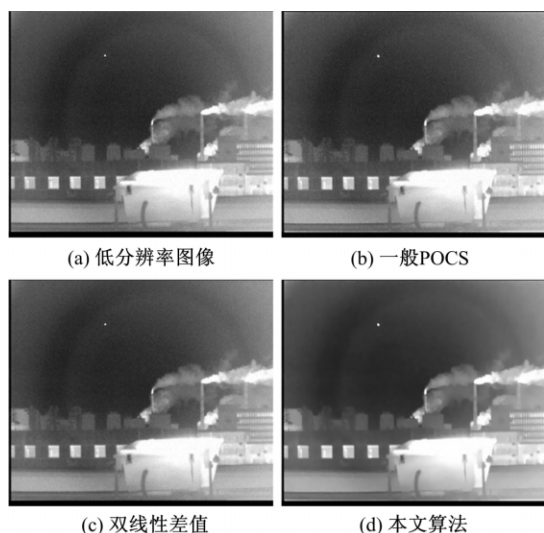


图 9 实际拍摄红外图像 SRIR 实验结果

Fig. 9 SRIR experimental results of real infrared images
算法重建图像的边缘细节更为清晰。

如图 10 所示,通过分析低分辨图像和本文算法重建的高分辨图像二维频谱可以看出,本文算法对噪声也起到了较好的抑制作用。

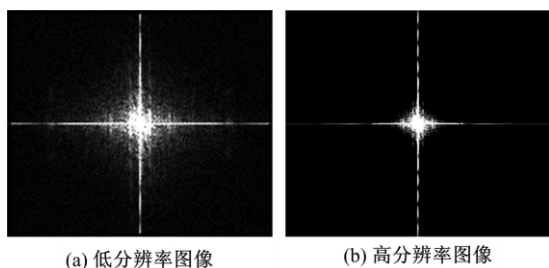


图 10 高、低分辨率图像二维频谱对比

Fig. 10 Comparison of two-dimensional spectra
between high and low resolution image

5 结束语

本文对微扫描红外成像超分辨重建方法的可行性进行了原理性验证,阐述了基于电机驱动光学透镜的微扫描图像获取方法。针对 POCS 算法对图像边缘细节保留能力差且易受噪声干扰等问题,提出一种基于字典学习的 POCS 重建算法。采用数值仿真和实际拍摄两种方式验证本文算法的有效性,结果均表明本文方法能够有效保持图像的边缘细节并对噪声有较好的抑制作用。

参考文献:

[1] 张东晓,鲁林,李翠华,等. 基于亚像素位移的超分辨率图像重建算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(12):2851-2861.

Zhang Dong-xiao, Lu Lin, Li Cui-hua, et al. Super-resolution image reconstruction algorithm based on sub-pixel shift[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(12): 2851-2861.

[2] Kim S P, Su W Y. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multi-frame images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(4): 534-539.

[3] Panda S S, Prasad M S R S, Jena G. POCS based super-resolution image reconstruction using an adaptive regularization parameter [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2011, 8(5): 155-158.

[4] 陈健,王伟国,刘廷霞,等. 基于梯度图的快速 POCS 超分辨率复原算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2):327-338.

Chen Jian, Wang Wei-guo, Liu Ting-xia, et al. Research on fast POCS super-resolution restoration algorithm based on gradient image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2):327-338.

[5] 陈健,王伟国,陈长青,等. 基于区域选择的快速 POCS 超分辨率复原算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6):804-815.

Chen Jian, Wang Wei-guo, Chen Chang-qing, et al. Research on fast POCS super-resolution restoration algorithm based on region selection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6):804-815.

[6] Zhang Xiang-jun, Wu Xiao-lin. Image interpolation by adaptive 2-D autoregressive modeling and soft-decision estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(6):887-896.

[7] 宋佳伟,徐煜明,肖贤建. 基于小波变换和迭代反向投影的超分辨率算法[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(2):74-77.

Song Jia-wei, Xu Yu-ming, Xiao Xian-jian. A super resolution algorithm based on wavelet transform and iterative back projection [J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(2):74-77.

[8] 吴宣沛,谢勤岚. 基于迭代反投影的彩色图像超分辨率重建[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(6): 1113-1117.

Wu Xuan-pei, Xie Qin-lan. Super-resolution of color images based on iterative back projection[J]. Computer & Digital Engineering, 2015, 43(6): 1113-1117.

[9] Mudanagudi U, Banerjee S, Kalra P K. Space-time super-resolution using graph-cut optimization[J].

- IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(5):995-1008.
- [10] Chantas G K, Galatsanos N P, Woods N A. Super-resolution based on fast registration and maximum a posteriori reconstruction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(7): 1821-1830.
- [11] 张地,何家忠. 基于特征空间的人脸超分辨率重构[J]. 自动化学报, 2012, 38(7):1145-1152.
Zhang Di, He Jia-zhong. Feature space based face super-resolution reconstruction[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(7):1145-1152.
- [12] 绍乐图,陈晨,张红刚,等. 改进的混合 MAP-POCS 超分辨率图像复原算法研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(2):41-45.
Shao Le-tu, Chen Chen, Zhang Hong-gang, et al. An improved hybrid MAP-POCS algorithm for super-resolution image restoration research[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 41-45.
- [13] 杨登全,姜伟,黄江平,等. 红外凝视成像系统中的微扫描器控制[J]. 红外技术, 2014, 36(7):556-561.
Yang Deng-quan, Jiang Wei, Huang Jiang-ping, et al. Micro-scanner control in staring infrared imaging systems[J]. Infrared Technology, 2014, 36(7): 556-561.
- [14] 黄燕,沈飞,黄整章,等. 压电式高精度位移微扫描控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 454-460.
Huang Yan, Shen Fei, Huang Zheng-zhang, et al. Micro-scanning control system design for piezoelectric high-precision displacement[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10s): 454-460.
- [15] 徐明飞,庞武斌,徐象如,等. 高数值孔径投影光刻物镜的光学设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 740-746.
Xu Ming-fei, Pang Wu-bin, Xu Xiang-ru, et al. Optical design of high-numerical aperture lithographic lenses[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 740-746.
- [16] 孙玉宝,韦志辉,肖亮,等. 多形态稀疏性正则化的图像超分辨率算法[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2898-2903.
Sun Yu-Bao, Wei Zhi-Hui, Xiao Liang, et al. Multimorphology sparsity regularized image super resolution[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2898-2903.
- [17] 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): 2989-2996.
Zhai Hai-tian, Li Hui, Li Bin. Infrared super resolution reconstruction based on region division[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2989-2996.
- [18] Yang J, Wright J, Huang T, et al. Image super-resolution via sparse representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(11): 2861-2873.