

文章编号: 0253-2239(2010)01-0086-05

一种改进的凝视红外图像高分辨率重建算法

白俊奇 陈 钱 王娴雅

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 光学微扫描和亚像元成像处理技术,是提高凝视型红外焦平面探测器空间分辨率的重要技术途径。通过分析 2×2 光学微扫描原理和图像插值重建模型,提出一种基于拉格朗日(Lagrange)多项式的高分辨率重建算法。算法根据局部梯度特征将图像划分成多个同性区域,在同性区域内自适应调整Lagrange的阶数,进而完成插值重建。实验表明,算法有效抑制了光学扫描误差引起的图像模糊,提高了红外成像系统的空间分辨率,具有较强的实用价值。

关键词 图像处理;光学微扫描;插值重建;红外焦平面阵列;拉格朗日多项式

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0086

An Improved High-Resolution Reconstruction Algorithm for Staring Infrared Image

Bai Junqi Chen Qian Wang Xianya

(School of Electronic Engineering and Optoelectronics Technique, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The combination of optical microscan and sub-pixel imaging technology is an effective method to improve the spatial resolution of infrared (IR) detectors. According to analyzing the optical microscan principle and the interpolation reconstruction model, a high resolution imaging algorithm is presented which is based on Lagrange polynomial. Firstly, the proposed algorithm divides the image into different isotropic areas based on local gradient, and secondly adjusts Lagrange exponents adaptively in these areas. Experimental results show that the proposed algorithm can eliminate image blurring arised from optical microscan effectively, improve spatial resolution of IR imaging system and has good application value.

Key words image processing; optical microscan; interpolation reconstruction; infrared focal plane array; Lagrange polynomial

1 引 言

受像元尺寸和探测器阵列大小限制等因素^[1,2]的影响,凝视型红外焦平面探测器^[3~5]空间分辨率较低。根据采样定理,当采样频率小于图像空间分辨率时,成像将因频率混叠产生图像失真。因此,提高成像空间采样率,减小光学衍射限的影响对发展高性能热成像系统具有重要的意义。基于光学微位移的亚像元成像^[6~8]在降低系统帧频的前提下,提

高焦平面阵列(FPA)的空间采样率,不仅改善了系统的传递特性和成像系统的作用距离,而且相对大规模的红外焦平面阵列,具有投资少、见效快的特点。亚像元成像技术正成为研究的热点,并且已经在航天遥感、热成像系统等领域^[9,10]获得成功应用。

后端电子学处理(包括高分辨率图像重建、噪声抑制等)是亚像元成像的不可缺少的组成部分,它能最大程度抑制光学扫描误差,改善成像质量。由于

收稿日期: 2009-02-20; 收到修改稿日期: 2009-03-23

基金项目: 国防预研基金(40405050303)、江苏省自然科学基金重点(BK2008049)和江苏省普通高校本科科研创新项目(CX08B-O45Z)资助课题。

作者简介: 白俊奇(1982—),男,博士研究生,主要从事红外图像实时处理技术研究。E-mail: baijunqi168@yahoo.cn

导师简介: 陈 钱(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测和数字视频等方面的研究。

E-mail: cheng@mail.njust.edu.cn

利用光学微扫描子图像直接重建会造成图像模糊,因此,本文结合光学微扫描原理和图像插值重建模型,基于拉格朗日(Lagrange)^[11,12]多项式提出了一种高分辨率图像重建算法。

2 亚像元技术和降采样模型

2.1 2×2 亚像元原理

设高分辨图像为 $\mathbf{O}(i, j), (i=1, \dots, 2M+1; j=1, \dots, 2N+1)$, 图像单元尺寸为 $(a/2) \times (b/2)$ 。当用单元尺寸为 $a \times b$ 的 $M \times N$ 元焦平面探测器通过 2×2 光学扫描分别位移 $(0, 0)$ 、 $(a/2, 0)$ 、 $(0, b/2)$ 和 $(a/2, b/2)$, 便可得到 4 幅低分辨率图像 $\mathbf{A}(k, l)$ 、 $\mathbf{B}(k, l)$ 、 $\mathbf{C}(k, l)$ 和 $\mathbf{D}(k, l), (k=1, \dots, M; l=1, \dots, N)$ 。若忽略光学扫描误差, 按照扫描顺序对低分辨率图像直接嵌入重构, 便可形成水平和垂直方向空间分辨率分别提高一倍的高分辨率图像。

2.2 降采样模型

设有 N 帧高分辨率(SR)图像为 $\{\mathbf{X}_k\}_1^N$, 经系统成像获得的 N 帧低分辨率(LR)图像为 $\{\mathbf{Y}_k\}_1^N$, 则两者关系^[13]可描述为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{F}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{U}_N \mathbf{B}_N \mathbf{F}_N \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_N \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{E}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{U}_k 为降采样矩阵, \mathbf{B}_k 为模糊矩阵, \mathbf{F}_k 为低分辨图像和高分辨图像间的运动补偿矩阵, \mathbf{E}_k 为噪声矩阵, $k=1, \dots, N$ 。

3 基于 Lagrange 插值的高分辨率重建模型

插值是图像重建中常用的数学运算, 通过离散采样点建立一个连续函数逼近真实曲线, 其精度及计算量与插值核函数有关。以最近邻插值、样条插值和 Lagrange 插值法为例, 最近邻插值法运算量小, 易于硬件实现, 然而频域特性较差, 傅里叶(Fourier)谱与理想低滤波器的性质相差很大, 图像的高频分量会出现块状效应。样条插值法保证了插值曲线或曲面的光滑性, 但是该类方法计算复杂、插值效果过于平滑, 导致重建图像比较模糊、损失较多边缘细节信息。Lagrange 插值是一种经典的数值方法, 插值精度与多项式阶数高度相关, 既避免了

最近邻插值的频域特性差, 又抑制了样条插值出现的图像模糊。

3.1 Lagrange 插值

把区间 $[a, b]$ 剖分为若干个单元, 在每个单元 $e_i = [x_{i-1}, x_i]$ 上讨论插值问题, 为方便, 把每个单元 e_i 变换到标准区间 $[-1, 1]$ 。

若在 $[-1, 1]$ 上做 n 次插值, 需取 $n+1$ 个插值节点 $-1 = \epsilon_0 < \epsilon_1 < \dots < \epsilon_n = 1$, 则对应的 n 次 Lagrange 插值公式可表示为

$$p(\epsilon) = \sum_{j=0}^n f_j N_j(\epsilon), \epsilon \in [-1, 1], \quad (3)$$

其中

$$N_j(\epsilon_i) = \prod_{k=0, k \neq j}^n \frac{(\epsilon_i - \epsilon_k)}{(\epsilon_j - \epsilon_k)} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (4)$$

f_j 为在节点 ϵ_j 的值, 即 $f_j = p(\epsilon_j), i, j = 0, 1, \dots, n$ 。

3.2 Lagrange 多项式阶数

选择适当的 Lagrange 多项式阶数是算法优劣的关键, 它与插值精度直接相关。插值阶数与图像同性区域大小相关。所谓同性区域, 就是符合一定规则的像素点的集合。

定义像素 (i, j) 的梯度 $\mathbf{G}(i, j)$ 和梯度差值 $\sigma_x(i, j), \sigma_y(i, j)$:

$$\mathbf{G}(i, j) = |f(i, j) - f(i-1, j)| + |f(i, j) - f(i, j-1)|, \quad (5)$$

$$\sigma_x(i, j) = \mathbf{G}(i, j) - \mathbf{G}(i-1, j), \quad (6)$$

$$\sigma_y(i, j) = \mathbf{G}(i, j) - \mathbf{G}(i, j-1), \quad (7)$$

其中 $f(i, j)$ 为 (i, j) 的灰度值。

图像同性区域划分如下:

1) 以像素点 $(i-1, j), (i, j)$ 和 $(i+1, j)$ 为例: 设阈值 T 若 $|\sigma_x(i, j)| < T$, 定义 $(i-1, j)$ 与 (i, j) 属于同一区域, 标记并继续比较 (i, j) 与 $(i+1, j)$ 是否属于同一区域; 相反, 若 $|\sigma_x(i, j)| > T$, 定义 (i, j) 不属于 $(i-1, j)$ 所在区域, 此时应开辟一个新区域, (i, j) 为新区域的首个元素, 标记并继续比较 $(i+1, j)$ 是否属于 (i, j) 所在区域; 阈值 T 需设定初始值;

2) 利用步骤(1)完成图像的各行和各列的标记, 算法定义同一区域的各个像素点的集合为一个同性区域。因此, 步骤(1)将图像划分为 M 个的同性区域。

设像素点 (i, j) 属于第 k 个同性区域 ($k=1, \dots, M$), I_{\max}, I_{\min} 分别是该区域第 i 行的最大值和最小值, J_{\max}, J_{\min} 分别是该区域第 j 列的最大值和最小值, 则像素点 (i, j) 的行和列 Lagrange 多项式阶数为

$$n_x(i, j) = I_{\max} - I_{\min}, \quad (8)$$

$$n_y(i, j) = J_{\max} - J_{\min}, \quad (9)$$

根据 $n_x(i, j)$ 和 $n_y(i, j)$ 可自适应重建高分辨率图像。

3.3 高分辨率重建模型

从图像降采样模型 $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{E}$ 可知, 要重建高分辨率图像, 需获取低分辨率图像 \mathbf{Y} 。算法低分辨率图像组 $\{\mathbf{Y}_k\}_1^4$ 利用光学微扫描亚像元成像获取分别为 $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{A}, \mathbf{Y}_2 = \mathbf{B}, \mathbf{Y}_3 = \mathbf{C}, \mathbf{Y}_4 = \mathbf{D}$, 其中, 低分辨率图像大小为 $M \times N$ 。算法利用 $\{\mathbf{Y}_k\}_1^4$ 重建高分辨率图像 \mathbf{X} , 大小为 $2M \times 2N$ 。重建模型为

1) 设定 \mathbf{Y}_1 为参考帧, 将 \mathbf{Y}_1 点 (k, l) 的像素值赋给高分辨图像 \mathbf{X} 的 $(2k, 2l)$ 位置, 其中 $k = 1, \dots, M, l = 1, \dots, N$;

2) 寻找同性区域, 计算插值阶数, 对图像 \mathbf{X} 进行自适应 Lagrange 插值, 获得 \mathbf{X} 中位置 $(2k+1, 2l), (2k, 2l+1), (2k+1, 2l+1)$ 的像素值;

3) 比较 \mathbf{X} 中像素点 $(2k+1, 2l)$ 与 \mathbf{B} 中像素点 (k, l) 值大小: 若两者相差不大, 说明光学扫描误差较小, 用亚像元成像 $\mathbf{B}(k, l)$ 替代 $\mathbf{X}(2k+1, 2l)$; 若两者相差较大, 说明光学扫描有一定误差, 可由两者均值对误差进行修正, 重建表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}(2k+1, 2l) = \mathbf{B}(k, l), & \text{small difference} \\ \mathbf{X}(2k+1, 2l) = \frac{\mathbf{X}(2k+1, 2l) + \mathbf{B}(k, l)}{2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

4) \mathbf{X} 中像素点 $(2k, 2l+1), (2k+1, 2l+1)$ 值同理求得。

根据上述模型对低分辨率图像组 $\{\mathbf{Y}_k\}_1^4$ 进行重建, 便可得出高分辨率图像 \mathbf{X} 。

4 算法仿真与数据分析

图片源于自行设计的红外光学微扫描成像系统, 该系统由优利斯(ULIS)公司 UL01011 型 $320 \times 240 \alpha\text{-Si}$ 微测辐射热计、平板透射微扫描调制器和后端信号处理电路组成。图 1 是光学微扫描四幅低分辨率亚像元子图像。图 2 是使用三次样条插值法^[14]对低分辨率图像进行放大重建, 由于样条函数特有的平滑作用, 使得图像细节部分退化, 与图 3 和图 4 相比, 衣服、头发丝变得模糊, 对比度下降。图 3 是基于最大后验概率(MAP)的超分辨率重建方法^[15], 图像视觉效果有一定改善, 该方法关键是确定良好的先验模型, 然而先验模型的选取存在一定的局限性, 如文献[15]采用的是基于马尔可夫随机场的泊松分布先验模型。图 4 是 Lagrange 插值高分辨率重建效果, 图像层次分明, 边缘清晰(镜框清晰可辨、衣服褶皱突出、发丝容易辨别), 视觉效果良好。图 5 是光学微扫描直接重建效果, 可知由于扫描误差引起了图像模糊(镜框有重影、衣服褶皱变差以及头发丝不清楚等)。



图 1 亚像元位移的低分辨率图像

Fig. 1 Low-resolution sub-pixel images



图 2 三次样条插值重建

Fig. 2 Cubic spline interpolation reconstruction



图 3 基于最大后验概率的超分辨率重建

Fig. 3 Super-resolution reconstruction based on MAP model



图 4 Lagrange 插值重建

Fig. 4 Lagrange interpolation reconstruction



图 5 亚像元直接重建

Fig. 5 Sub-pixel immediate reconstruction

为了定量评价算法重建效果,使用峰值信噪比 (PSNR) k_{PSNR} 和辐射分辨率 (RR) k_{RR} 对作为评价参数 (PSNR 增大, 则图像信噪比增大; 辐射分辨率增大, 则图像细节变好), 两者定义为

$$k_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left\{ \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - \bar{I}(i,j)]^2} \right\}, \quad (11)$$

$$k_{\text{RR}} = 10 \lg \left[1 + \frac{\sqrt{V(I)}}{E(I)} \right], \quad (12)$$

式中 $V(I)$ 为方差, $E(I)$ 为均值。

表 1 给出了不同图像重建方法的实验结果, 可见与原始低分辨率图像相比, 三次样条插值和亚像元直接重建都未能提高辐射分辨率, 而基于 MAP 的超分辨率重建和基于光学微扫描的 Lagrange 插值法一定程度提高了辐射分辨率。在峰值信噪比方面, Lagrange 插值法最优, 基于 MAP 的超分辨率重建和三次样条插值法次之, 亚像元直接重建最差。

表 1 不同重建方法实验结果

Table 1 Experimental results by different methods

Image	PSNR	RR
Original image	12.862	2.361
Spline reconstruction	11.889	2.081
MAP reconstruction	12.027	2.784
Immediate reconstruction	9.071	1.482
Lagrange reconstruction	12.602	3.204

低分辨率图像的重建等同于逆滤波问题, 为了促使拟和函数最佳逼近真实曲线, 往往需要足够的先验知识, 建立合理的数学模型。该类方法只是对真实图像的合理近似, 虽然能一定程度改善图像的视觉效果, 但是不能从本质上提高空间采样率, 改善图像的空间传递函数 (MTF) 特性。基于光学微扫描的 Lagrange 重建利用多个真实采样图像, 有效提高了空间分辨率, 改善了成像系统的作用距离。

5 结 论

针对凝视型红外焦平面探测器空间分辨率较低的特点, 提出一种基于 Lagrange 多项式的高分辨率图像插值重建算法。利用局部梯度特征将图像划分成多个同性区域, 在同性区域内自适应调整 Lagrange 的阶数, 进而完成插值重建。实验表明, 算法有效抑制了光学扫描误差引起的图像模糊, 提高了红外成像系统的空间分辨率, 对发展高性能热成像系统有重要意义。

参 考 文 献

- Wu Xinshe, Cai Yi. Infrared staring imaging system photonics microscanning technique[J]. *Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(1): 10~14
吴新社, 蔡毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(1): 10~14
- John Lester Miller, John Wilste. Benefits of microscan for staring infrared imagers[C]. *SPIE*, 2004, **5407**: 127~138
- Wang Xiaorui, Zhang Jianqi, Feng Zhouxiang *et al.*. Triangle orientation discrimination threshold curve prediction based on staring thermal imaging simulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1036~1041
王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥等. 凝视热成像系统的三角方向鉴别阈值曲线预测[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1036~1041
- Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869
白俊奇, 陈钱. 基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 866~869
- Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao *et al.*. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1266~1270
范长江, 王肇圻, 吴环宝等. 红外双波段双层衍射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1266~1270
- Su Binghua, Jin Weiqi. Super-resolution image restoration algorithm based on Possion-Markov model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(1): 41~44
苏秉华, 金伟其. 基于 Possion-Markov 场的超分辨率图像复原算法[J]. *电子学报*, 2003, **31**(1): 41~44
- Jin Weiqi, Wang Chunyong, Zhang Nan *et al.*. Study on sub-pixel processing algorithm for scanning FPA thermal imaging system[J]. *Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **24**(4): 261~264
金伟其, 王春勇, 张楠等. 扫描型平面热成像系统的亚像元处理算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(4): 261~264
- Xu Chao, Jin Weiqi, Li Yadong *et al.*. An improved sub-pixel

- processing algorithm based on focal plane detector [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(8): 1608~1611
- 徐超, 金伟其, 李雅琼等. 一种改进的凝视焦平面探测器亚像元成像处理算法[J]. *电子学报*, 2007, **35**(8): 1608~1611
- 9 Zuo Yueping, Zhang Weiqi. Several model theoretic modeling and simulating of microscanning imaging system [J]. *Infrared and Millimeter Waves*. 2003, **22**(2): 145~148
- 左月萍, 张建奇. 几种工作模式的微扫描成像系统的理论建模和仿真[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(2): 145~148
- 10 Stadtmiller T, Gillette J, Hardie R. Reduction of aliasing in staring infrared imagers utilizing sub-pixel techniques [J]. *Proc. IEEE*, 1995, **2**: 874~880
- 11 Zhou Jie, Zou Shidi, Li Ming *et al.*. A layered group key distribution scheme based on the Lagrange interpolation polynomial [J]. *J. Xiamen University (Natural Science)*, 2007, **46**(2): 75~78
- 周杰, 邹仕第, 黎明等. 基于拉格朗日插值多项式的层次式组密钥分发方案[J]. *厦门大学学报*, 2007, **46**(2): 75~78
- 12 Chen Guiqiang, Wang Liqin, Li Yujian. Color image sharing method based on Lagrange's interpolating polynomial [J]. *Computer Measurement & Control*, 2008, **16**(7): 1030~1032
- 陈桂强, 王丽琴, 李玉鉴. 基于拉格朗日插值多项式的彩色图像分存方案[J]. *计算机测量与控制*, 2008, **16**(7): 1030~1032
- 13 Han Yubing, Wu Lenan. Super resolution reconstruction of video sequence based on adaptive filter [J]. *Chinese J. Computers*. 2006, **29**(40): 642~647
- 韩玉兵, 吴乐南. 基于自适应滤波的视频序列超分辨率重建[J]. *计算机学报*, 2006, **29**(40): 642~647
- 14 Yang Yunfeng, Hu Jinyan. Image interpolation algorithm based on spline function [J]. *J. Daqing Petroleum Institute*, 2005, **29**(5): 88~89
- 杨云峰, 胡金燕. 基于样条函数的图像插值算法[J]. *大庆石油学院学报*, 2005, **29**(5): 88~89
- 15 Su Binghua, Jin Weiqi, Niu Lihong *et al.*. Poisson-map super-resolution image restoration algorithm with markov constraint [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 492~496
- 苏秉华, 金伟其, 牛丽红等. 基于 Markov 约束的泊松最大后验概率超分辨率图像复原法 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(4): 492~496