

一种改进的凝视焦平面探测器亚像元成像处理算法

徐 超,金伟其,李雅琼,王 霞

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系,北京 100081)

摘 要: 利用光学微扫描和亚像元成像处理技术,实现亚像元成像系统是当前提高光电成像系统空间分辨率的重要技术途径.本文在分析二维凝视焦平面探测器的亚像元成像和重构原理的基础上,提出了一种改进的基于二维 $\times 2$ 微扫描的亚像元成像处理方法,解决了边界精确标定法的标定以及边界值近似法的误差问题.模拟分析表明:算法可有效实现亚像元成像,且处理工作量小,易于实现实时处理,可望在可见光和红外亚像元成像领域获得应用,算法对于发展高性能热成像系统具有重要的理论指导意义和实用价值.

关键词: 热成像;光学微扫描;亚像元成像;图像处理;边界处理

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 08-1608-04

An Improved Sub-Pixel Processing Algorithm Based on Focal Plane Detector

XU Chao, JIN Wei-qi, LI Ya-qiong, WANG Xia

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Utilizing optical microscanning technique and sub-pixel imaging processing to achieve sub-pixel imaging system is an important technical method to improve the spatial resolution of optoelectronic imaging system. By analyzing the sub-pixel imaging and microscanning reconstruction of two-dimension staring focal plane detector, the paper presents a kind of sub-pixel processing algorithm based on two-dimension microscanning and solves the margin demarcation problems. By analyzing the result of simulation, this algorithm is good for achieving sub-pixel imaging and easy to achieve real-time processing because of small processing load. The processing algorithm can be widely used in the field of visible light and infrared imaging system. Application of this processing algorithm will enormously enhance staring thermal imaging system's performance.

Key words: thermal imaging system; optical microscanning; sub-pixel imaging; image processing; margin processing

1 引言

凝视型焦平面探测器的空间离散性使成像成为空间离散采样成像过程^[1].根据采样定理,当采样频率小于图像空间频率时,成像将因频率混叠产生图像失真.由于目前红外焦平面阵列探测器单元尺寸较大,阵列规模较小,且工作波长较可见光高一个数量级,因此,提高成像空间的采样率,减小光学衍射限影响对于发展高性能热成像系统具有重要的意义.基于微扫描技术(Microscanning)提高焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)探测器的空间采样率以及亚像元成像处理算法重构图像细节——亚像元成像技术是一种减小或消除欠采样效应的有效手段^[2~5],不仅可在保证系统信噪比的条件下,改善系统的传递特性,提高系统作用距离,而且相对投资研制新的高性能探测器,具有投入少、见效快的特点.因此,将这种性价比高的技术应用到实际成像系统中成为研究的热点方向,并已在航天遥感、热成像系统

和显微成像等领域获得成功应用^[6~8].

亚像元成像处理算法是亚像元成像的核心技术,目前对于线阵扫描型和面阵凝视型亚像元成像处理算法已有一些研究,但有许多算法仅停留在对过采样图像的重构,并未实现真正意义上的亚像元成像^[9~13].我们在最近的研究中^[14]提出了一种针对凝视型焦平面的亚像元成像处理算法,理论上可实现 $1/4$ 探测单元的分辨,且算法处理量小,可实现快速实时处理,但算法要求对视场边界的信号(辐射或亮度)进行标定处理,增加了技术实现的难度.为此,本文将研究一种改进的凝视焦平面探测器亚像元成像算法,解决或减轻要求视场边界标定的问题,进一步提高算法的可操作性.

2 二维凝视亚像元成像处理算法的实现

2.1 二维凝视焦平面探测器的亚像元成像处理

设高分辨率图像为 $O(i, j)$, $(i = 1, 2, \dots, 2N + 1; j = 1, 2, \dots, 2M + 1)$, 图像单元尺寸 $(a/2) \times (b/2)$. 当用

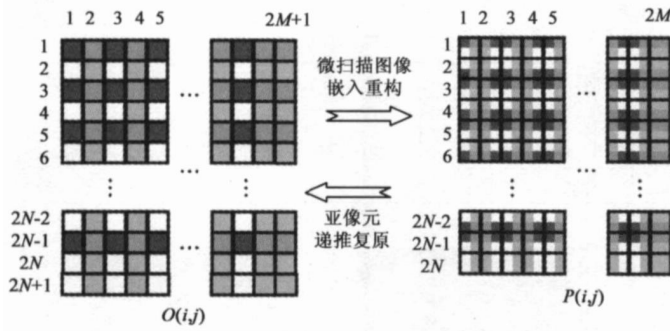


图 1 过采样成像与亚像元成像

单元尺寸为 $a \times b$ 的 $N \times M$ 元焦平面探测器进行 2×2 模式微扫描成像时,4 帧低分辨率微扫描图像 $A(k, l)$ 、 $B(k, l)$ 、 $C(k, l)$ 和 $D(k, l)$ ($k=1, 2, \dots, N; l=1, 2, \dots, M$) 分别位移 $(0, 0)$ 、 $(a/2, 0)$ 、 $(a/2, b/2)$ 和 $(0, b/2)$, 每个探测器单元信号包含有原高分辨率图像 $O(i, j)$ 的 4 个像元信息. 如图 1, 由 A 、 B 、 C 和 D 图像直接嵌入重构 $2N \times 2M$ 过采样图像 P 时, 图像 P 与 O 对应像素值之间的关系为:

$$P(i, j) = [O(i, j) + O(i, j+1) + O(i+1, j) + O(i+1, j+1)] / 4, \quad i=1, 2, \dots, 2N; j=1, 2, \dots, 2M \quad (1)$$

式(1)改写为矩阵形式:

$$P_1 = \frac{1}{4} (W O_1 + O) \quad (2)$$

式中, P_1 是图像 $P(i, j)$ 按行列顺序展开的 $(2N \times 2M) \times 1$ 列矢量, 即 $P_1[2(i-1) \cdot M + j] = P(i, j)$, O_1 是图像 $O(i, j)$ 中 $2N \times 2M$ 的像元按行列顺序展开的 $(2N \times 2M) \times 1$ 列矢量, 即 $O_1[2(i-1) \cdot M + j] = O(i, j)$, 边界矩阵 O 是图像 $O(i, j)$ 第 $2N+1$ 行和 $2M+1$ 列边界值重构的 $(2N \times 2M) \times 1$ 列矢量

$$O = [0 \dots 0, O(1, 2M+1) + O(2, 2M+1), \dots, 0 \dots 0, O(i, 2M+1) + O(i+1, 2M+1), \dots, 0 \dots 0, O(2N-1, 2M+1) + O(2N, 2M+1), O(2N+1, 1) + O(2N+1, 2), \dots, O(2N, 2M+1) + O(2N+1, 2M) + O(2N+1, 2M+1)]^T \quad (3)$$

变换矩阵 W 由 $2N \times 2M$ 个子矩阵 w_r ($r=1, 2, \dots, 2N \times 2M$) 构成, 每个子矩阵 w_r 的大小为 $2N \times 2M$, 即

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_r, \dots, w_{2N \times 2M-1}, w_{2N \times 2M}]_{4N^2 \times 4M^2}^T \quad (4)$$

$$w_r = \begin{cases} [0 \dots 01 \ 00 \ \dots \ 01 \ 00 \ \dots \ 0]_{1 \times (2N \times 2M)} & r=2t \cdot M; t=1, 2, 3, \dots, 2N-1 \\ [0 \dots 011 \ 00 \ \dots \ 011 \ 00 \ \dots \ 0]_{1 \times (2N \times 2M)} & r=2t \cdot M-1; t=1, 2, 3, \dots, 2N-1 \\ \text{other} & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

由于过采样图像 P 像元素为 $(2N) \times (2M)$, 而原图

像 O 的像元数为 $(2N+1) \times (2M+1)$, 因此, 难以直接由 P 确定原图像 O . 可以证明: 由于 $|W| \neq 0$, 即 W 可逆, W^{-1} 存在, 因此, 如果我们把实际成像视场限制在 O_1 , 即能够事先确定边界矩阵 O 的数值, 则由式(2)可得到

$$O_1 = W^{-1}(4P_1 - O) \quad (6)$$

即由过采样图像 P 可唯一地确定高分辨率原图像 O ; 求解原图像的关键过程之一是确定边界矩阵 O .

2.2 一种不需标定的边界矩阵处理方法

我们已提出精确边界法、外推近似法等确定边界矩阵的算法^[14]. 前者需要进行精确地标定边界值; 而后者利用外推方式确定边界值, 虽不需边界标定, 但会引入近似误差. 这里从系统实现的角度出发, 提出一种改进的不需标定的边界矩阵确定方法——视场边界遮挡法, 即在实际系统成像过程中采用物理方法遮挡边界视场的 2 个边界像元, 使图像 $O(i, j)$ 的第 $2N+1$ 行和 $2M+1$ 列分别等于第 $2N$ 行和 $2M$ 列的值(如图 1), 式(2)可进一步写成为

$$P_1 = \frac{1}{4} (W + W) O_1 = \frac{1}{4} W O_1 \quad (7)$$

这里, 变换矩阵 W 由 $2N \times 2M$ 个子矩阵 w_r ($r=1, 2, \dots, 2N \times 2M$) 构成, 子矩阵 w_r 的大小为 $2N \times 2M$, 即

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_r, \dots, w_{2N \times 2M-1}, w_{2N \times 2M}]_{4N^2 \times 4M^2}^T \quad (8)$$

$$w_r = \begin{cases} [0 \dots 02 \ 00 \ \dots \ 02 \ 00 \ \dots \ 0]_{1 \times (2N \times 2M)} & r=2tM, t=1, 2, 3, \dots, 2N-1 \\ [00 \ \dots \ 022 \ 00 \ \dots \ 0]_{1 \times (2N \times 2M)} & r=2N \times 2M - 2N + 1, \dots, 2N \times 2M - 1 \\ [00 \ \dots \ 03 \ 0]_{1 \times (2N \times 2M)} & r=2N \times 2M \\ [0 \dots 011 \ 00 \ \dots \ 011 \ 00 \ \dots \ 0]_{1 \times (2N \times 2M)} & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

变换矩阵 W 是对角线元素不为零的上对角矩阵, 存在逆矩阵 $U = W^{-1}$, 由式(7)可得

$$O_1 = 4UP_1 \quad (10)$$

式中, 逆矩阵 U 为一个元素有规律排列的上三角稀疏矩阵

$$U = \begin{bmatrix} u & -u & u & -u & \dots & -u \\ & u & -u & u & & \dots \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \dots \\ & & & \ddots & -u & u \\ & & & & u & -u \\ & & & & & u \end{bmatrix}_{4N^2 \times 4M^2} \quad (11)$$

其中, 每一个子矩阵 u 也为上三角形矩阵

$$u = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & \dots & -0.5 \\ & 1 & -1 & 1 & & \dots \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \dots \\ & & & \ddots & -1 & 0.5 \\ & & & & 1 & -0.5 \\ & & & & & 0.5 \end{bmatrix}_{2N \times 2M} \quad (12)$$

即由过采样图像 P 可唯一地确定原有的高分辨率亚像元图像 O_1 。

2.3 基于凝视焦平面探测器的亚像元成像快速处理算法

虽然可通过过采样图像 P 获得高分辨率的原图像 O , 但直接采用式 (10) 计算量和存储量都很大, 难以实现实时处理. 因此, 需要研究存储量和计算量小的快速处理算法, 才能使算法在实际成像系统中实现.

考虑到式 (4), 式 (10) 可写成递推形式:

$$\begin{cases} O(2N, 2M) = P(2N, 2M) \\ O(2N, 2M-l) = 2P(2N, 2M-l) - O(2N, 2M-l+1) \\ \quad l=1, 2, \dots, 2M-1 \\ O(2N-k, 2M) = 2P(2N-k, 2M) - O(2N-k+1, 2M) \\ \quad k=1, 2, \dots, 2N-1 \\ O(2N-k, 2M-l) = 4P(2N-k, 2M-l) - O(2N-k, 2M-l+1) - O(2N-k+1, 2M-l) - O(2N-k+1, 2M-l+1) \\ \quad (k=1, 2, \dots, 2N-1, l=1, 2, \dots, 2M-1) \end{cases} \quad (13)$$

即在预设高分辨率图像 O 的 $2N+1$ 行和 $2M+1$ 列分别与第 $2N$ 行和 $2M$ 列对应像元灰度相等的条件下, 对过采样图像 P 的每个像元进行一次乘法 (可通过 2 次移位操作) 和三次减法即可实现高分辨率亚像元图像的重构. 这样的计算处理量采用目前的数字处理芯片完全可实现快速的实时处理.

为了实现图像 O 的 $2N+1$ 行和 $2M+1$ 列分别与第 $2N$ 行和 $2M$ 列对应像元灰度相等, 可在光学系统视场光阑处设置恒定的边框或预埋黑体, 这种技术在目前的可见光和红外光学系统中均已有使用. 因此, 本文提出的亚像元成像处理算法可望在基于可见光或红外凝视焦平面探测器的光电成像系统中实现.

3 算法模拟、分析与比较

为了定量评价亚像元成像的重现精度, 引入常用的平均绝对差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方差 (Mean Squared Error, MSE) 和峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise, PSNR) 作为评价参数^[14] (MSE 和 MAE 值越小、PSNR 值越大说明对应的图像与原图像越相近). 图 2 给出对实际热图像的处理图像, 表 1 给出图 2 处理图像的评价参数. 可以看出: 亚像元处理图像不仅目视效果与原图像一致, 而且评价参数也表明两图像非常接近, 其间偏差

属于计算误差.

表 1 亚像元处理的评价参数

图像处理形式	MSE	MAE	PSNR
插值图像	0.023005	0.1132	74.905
过采样重构图像	0.042778	0.12988	72.211
亚像元处理图像	1.1537×10^{-27}	3.3521×10^{-14}	327.9

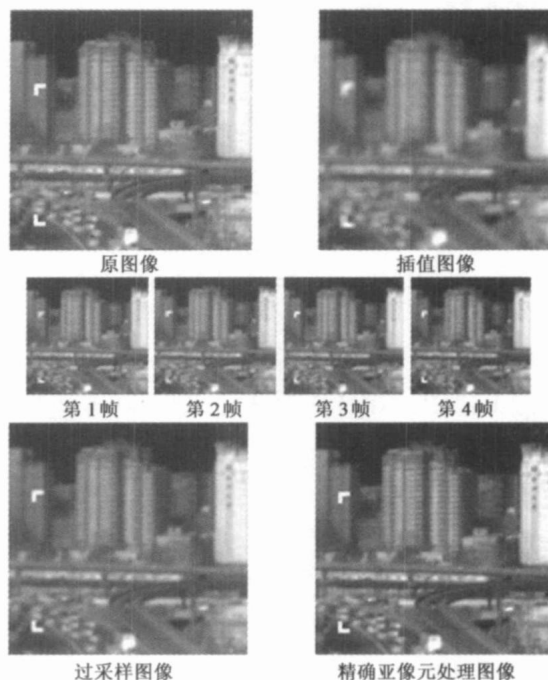


图 2 实际热图像的处理效果图

4 结束语

本文在证明了 O 图像 $2N+1$ 行和 $2M+1$ 列分别与 $2N$ 行和 $2M$ 像素值相同的情况下, 通过亚像元处理, 可快速地恢复高分辨率亚像元图像. 由于无需预先标定边界, 使算法具有实用性和可行性. 本算法已在我们研制的可见光亚像元成像实验系统中应用.

需要指出: 由于等效探测器响应面积减小 (1/4 面积), 在长波热红外成像中, 光学衍射限可能成为主要的限制因素, 减小对系统传递函数的改善程度. 对于光学衍射及其他滤波的影响可采用超分辨率图像处理技术等做进一步的处理.

利用光学微扫描技术提高光电成像系统, 特别是热成像系统的空间分辨率是当前国内外技术发展的重要方向, 但这一技术必须与后续图像处理算法结合才能获得较好的图像改善. 本文算法不仅可改善成像质量, 而且处理算法简单, 计算量小, 可实现实时处理, 能够在实际系统中获得有效的应用.

参考文献:

[1] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术 [M]. 北

- 京:北京理工大学出版社,1995.9.
- Zhang Jing-Xian, Li Yu-Dan, JIN Wei-Qi. Low Light Level and Infrared Imaging Technology [M]. Beijing Institute of Technology Press, Beijing. 1995. 9. (in Chinese)
- [2] S Kim, N Bose, H Valenzuela. Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled mutiframes [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1990, 38 (6) :1013 - 1027.
- [3] H Ur, D Gross. Improved resolution from subpixel shifted pictures [J]. CVGIP: Graphical models and Image Processing, 1992, 54(2) :181 - 186.
- [4] Russell C Hardie, Kenneth J Barnard, John GBogner, et al. High resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system [J]. Optical Engineering, 1998, 37(1) :247 - 260.
- [5] 刘新平, 高瞻, 邓年茂, 等. 面阵 CCD 作探测器的“亚像元”成像方法及实验 [J]. 科学通报, 1999, 44 (15) :1603 - 1605.
- Liu Xinping, Gao Zhan, Deng Nianmao. Method and experiment of subpixel imaging using area CCD [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(15) :1603 - 1605. (in Chinese)
- [6] Christophe Latry, Bernard Rouge, SPOT5 THR MODE [A]. SPIE. 3439 [C]. San Diego, California. 1998.
- [7] Jenoptik System. ProgRes C14plus Technical Data [EB/OL]. www.jenoptik.com, 2006.
- [8] LION-Lightweight Infrared Observation Nightsight [EB/OL]. www.thalesgroup-optronics.com, 2005.
- [9] Fred P Blommel, Peter N J Dennis. The effects of microscan operation on staring infrared sensor imagery [J]. SPIE, 1991, 1540:653 - 664.
- [10] Jean Fortin, Paul Chevrere. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays [J]. Proceedings of the SPIE, 1996, 2743:185 - 196.
- [11] Li W, V Haese-Coat, J Ronsin. Quantitative evaluation of detail-preserving and noise-removal abilities of morphological filters [A]. Proceedings International Conference on Image Processing [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 1995, 1:510 - 513.
- [12] 李相国, 汶德胜, 王华. TDICCD 亚像元技术应用于小相对孔径光学系统 [J]. 光子学报, 2004, 33 (10) :1243 - 1246.
- Li Xiangguo, Wen Desheng, Wang Hua, Zhuo Yue. Application of TDI CCD and sub2pixel imaging technique relative aperture optical systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33 (10) :1243 - 1246. (in Chinese)
- [13] 王晓蕊, 胡方明, 张建奇. 基于微扫描的焦平面阵列成像特性研究 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2005, 32(3) :392 - 395.
- Wang Xiaorui, Hu Fangming, Zhang Jianqi. Research on the FPA imaging Character based on microscanning [J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(3) :392 - 395. (in Chinese)
- [14] 李雅琼. 基于 2×2 微扫描的亚像元成像处理算法研究 [D]. 北京:北京理工大学硕士论文, 2006.

作者简介:



徐超 男, 1979 年生, 2001 年获得北京理工大学学士学位, 2006 年获得北京理工大学工学博士学位. 现为北京理工大学信息科学技术学院光电工程系讲师. 主要研究方向是图像处理、光电成像系统以及热成像技术.
E-mail: rockyxu@bit.edu.cn



金伟其 男, 1961 年生, 1982 年毕业于北京工业学院光电工程系, 1990 年获得北京理工大学工学博士学位. 现为北京理工大学教授, 博士生导师, 曾获国家科技进步二、三等奖和多项部级科技进步奖, 发表学术论文 200 余篇. 主要从事夜视与红外技术、光电检测技术、图像处理技术和电子光学等教学和研究工作.
E-mail: jinwq@bit.edu.cn