

文章编号:1001-9014(2012)02-0122-05

# 扫描型 IRFPA 非均匀微扫描的无边框 亚像素热成像处理算法

陈艳, 金伟其, 王岭雪, 刘崇亮, 陈伟力, 刘斌  
(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**针对扫描型热成像中垂直方向微扫描帧间位移不再精确为半像素的情况,按照错位方向的不同,分别采用近似回代算法进行图像重构,并对不同错位方向中近似回代引入的误差进行规律分析,提出一种非均匀微扫描情况下的无边框亚像素热成像处理算法.该算法采用邻近像元对边界像元进行近似回代,并根据统计学原理对近似回代过程中引入的误差进行优化,获得与原始图像高度近似的亚像素图像.实验表明,效果明显好于过采样和直接的近似回代,并且算法简单,处理量小,易于实现实时处理.对提高扫描型热成像系统的技术性能指标具有重要意义.

**关键词:**扫描型热成像;非均匀微扫描;近似回代;亚像素处理  
**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A

## Algorithm of sub-pixel thermal imaging for nonuniform micro-scanning in scanning IRFPA without boundary

CHEN Yan, JIN Wei-Qi, WANG Ling-Xue, LIU Chong-Liang, CHEN Wei-Li, LIU Bin  
(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,  
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** For the thermal images obtained with scan, it happens frequently that the interframe micro-displacement in vertical direction is no longer equivalent to accurate half-pixel. An approximating recursive technique, dealing with the dislocation at different direction, is introduced to reconstruct the image with high resolution. By analyzing the error distribution caused by the approximating recursion, a sub-pixel processing algorithm to reduce the error is proposed. The algorithm uses neighboring pixel to approximate the boundary, and the statistical principle is used to minimize the error introduced by the approximation. The obtained sub-pixel image is highly similar to the original image. All the simulation results and experiment data show that the performance of the algorithm proposed in this paper is obviously better than that of over-sampling and approximating recursive reconstruction. The algorithm is simple and effective. A real time processing is easily achieved. The realization of the algorithm has great significance in improving the technological performance of scanning thermal imaging system.

**Key words:** scanning thermal imaging; nonuniform micro-scanning; approximating recursion; sub-pixel processing  
**PACS:** 42.30. Wb

## 引言

扫描型红外焦平面探测器是当前高性能二代热成像系统采用的主要探测器类型之一,法国 SOFRADIR 公司  $288 \times 4$ 、 $480 \times 6$ 、 $576 \times 6$  等探测器<sup>[1]</sup>已成为国际普遍使用的扫描型焦平面探测器类型. Thalse 公司采用  $288 \times 4$  焦平面探测器研制的 Cath-

erine-FC/Catherine-GP/SOPHIE 等均是国际有名的热成像系统. Catherine-FC 热成像系统采用  $288 \times 4$  焦平面探测器与一维光机扫描,形成 288TVL 的标准视频热图像信号. Catherine-GP 热成像系统则在 FC 的基础上,采用一种垂直点头式的光学微扫描机构,获得 576TVL 的标准视频热图像信号<sup>[2]</sup>.

基于微扫描的亚像素成像处理技术可在基本不

收稿日期:2011-02-15,修回日期:2011-12-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(2009AA11Z204)

Foundation item: National High Technology R&D Program (No. 2009AA11Z204)

作者简介:陈艳(1984-),女,湖北公安人,博士,主要研究方向为夜视与红外技术及视频图像处理技术. E-mail: chenyan340206@yahoo.com.cn.

Received date: 2011-02-15, revised date: 2011-12-15

降低系统信噪比的条件下,获得小于探测器几何尺寸的空间分辨,成为一种提高热成像系统质量的有效手段.文献[3]提出了一种  $288 \times 4$  焦平面探测器的亚像元热成像处理算法,从理论上证明了获得亚像元成像分辨的可行性.在获得过采样图像时,相邻图像帧理想的相对位移量是半个探测器单元尺寸,但实际上往往都会存在偏差,此即非均匀微扫描,因此,文献[4]进一步研究了基于边框视场光阑的非均匀微扫描亚像元成像处理算法.考虑到实际系统实现边框视场光阑存在技术难度,本文将在以上工作基础上,研究一种无边框视场光阑限制下,考虑非均匀微扫描的实用化扫描型亚像元热成像处理算法.

## 1 非均匀微扫描对亚像元成像性能的影响

为了描述微扫描对探测器成像性能的影响,通常采用传递函数的概念进行对比分析.在非均匀微扫描中,设实际微扫描位移与精确半个像素位移之间差值相对于半像素百分比为错位率,记为  $\alpha$  (假定探测器填充率为 1),则非均匀微扫描下过采样图像的 MTF 为<sup>[5]</sup>

$$\text{MTF}_{\text{over}}(\xi, \alpha) = \text{sinc}\left(\frac{\xi}{2\xi_n}\right) \text{sinc}\left(\frac{\xi}{4\xi_n}\right) \cos\left(\pi \frac{\alpha\xi}{4\xi_n}\right). \quad (1)$$

亚像元处理图像的 MTF 为<sup>[5]</sup>

$$\text{MTF}_{\text{sub}}(\xi, \alpha) = \frac{1}{2} \left\{ (1 - \alpha) \text{sinc}^2 \left[ \frac{(1 - \alpha)\xi}{4\xi_n} \right] + (1 + \alpha) \text{sinc}^2 \left[ \frac{(1 + \alpha)\xi}{4\xi_n} \right] \right\}, \quad (2)$$

其中  $\xi_n$  为 Nyquist 频率,为便于比较,图 1 给出在  $\xi = \xi_n$  时  $\text{MTF}_{\text{over}}$  和  $\text{MTF}_{\text{sub}}$  随错位率  $\alpha$  的变化情况.可以看出,过采样和亚像元成像的 MTF 曲线都在  $\alpha = 0$  峰值点左右区间内对称下降,说明对于任意  $\alpha \neq 0$  的非均匀微扫描情况都会破坏过采样和亚像元的成像性能,且  $|\alpha|$  越大,破坏程度越明显.由图中曲线,可以看出  $|\partial \text{MTF}_{\text{sub}} / \partial \alpha| \geq |\partial \text{MTF}_{\text{over}} / \partial \alpha|$ ,即相对于过采样成像,  $|\alpha|$  的增大对亚像元成像的影响更为严重,因此,考虑非均匀微扫描下的亚像元成像尤为必要.

## 2 非均匀微扫描的无边框亚像元热成像算法

### 2.1 算法原理

由于扫描型焦平面在扫描(水平)方向是卷积成像,微扫描主要在垂直方向进行,因此本文主要分析垂直方向的成像关系.在非均匀微扫描下,设微扫描位移为  $c/2 - \tau_v$ ,其中  $c$  为探测器垂直方向尺寸,  $\tau_v$  为相对于半像素的错位量,则错位率为  $-1 < \alpha = \tau_v /$

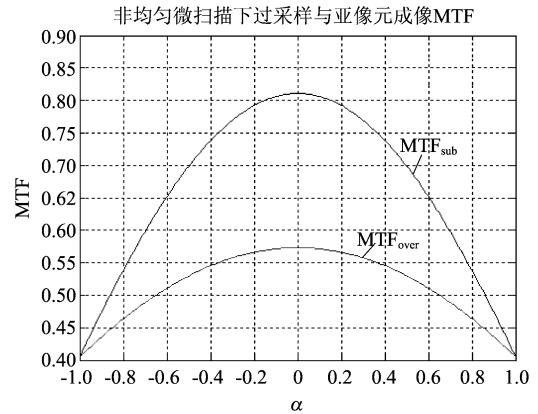


图 1 非均匀微扫描下错位率对传递函数的影响  
Fig.1 Influence of dislocation rate on the MTF under nonuniform micro-scanning

( $c/2$ )  $< 1$ ,由于错位方向直接影响探测器采样点的位置,因此,下文按照上错位和下错位两种情况进行分析.

如图 2 所示,上错位时,过采样图像 P 由微扫描前欠采样图像  $C_1$  和微扫描后上错位欠采样图像  $C_2$  交错插值组成,其表达式为:

$$\begin{cases} P(2i-1, j) = [0(2i-1, j) + 0(2i, j)]/2 \\ P(2i, j) = [\alpha 0(2i-1, j) + 0(2i, j) + (1-\alpha)0(2i+1, j)]/2 \end{cases} \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, 2n)$

由此可得原始高分辨力图像 O 与过采样图像 P 的关系式为:

$$\begin{cases} 0(2i, j) = \frac{2[P(2i, j) - \alpha P(2i-1, j)]}{(1-\alpha)} - 0(2i+1, j) \\ 0(2i-1, j) = 2P(2i-1, j) - 0(2i, j) \end{cases} \quad (4)$$

$(i = m, m-1, \dots, 1; j = 1, 2, \dots, 2n)$

即重构原始图像 O 的关键在于确定边界像元  $O(2m+1, j)$  的值.

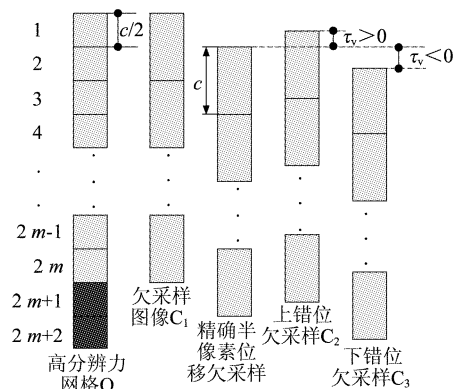


图 2 非均匀微扫描错位方式  
Fig.2 Dislocation situations of nonuniform micro-scanning

文献[3]提出在视场光阑处设置恒定的边框,使  $O(2m+1, j)$  所对应的场景为视场光阑上的设定值,则对应的像元灰度就可采用预先标定的值,由(4)式的递推计算即可实现亚像元图像的精确重构.但在实际扫描型 IRFPA 的光学系统中(如图3),由于空间位置狭小,实现边框视场光阑存在一定的技术难度,因此,实用的亚像元处理算法最好是无边框视场光阑的情况.

在无边框视场光阑时,考虑到图像相邻行像素灰度变化不会太快,采用文献[6]的近似回代法定义,即用  $O$  的第  $2m$  行近似第  $2m+1$  行:

$$O(2m+1, j) \approx O(2m, j) \quad (j = 1, 2, \dots, 2n), \quad (5)$$

则可得近似回代法重构图像  $O_b$  的最后两行像元为:

$$\begin{cases} O_b(2m, j) = \frac{P(2m, j) - \alpha P(2m-1, j)}{(1-\alpha)} \\ O_b(2m-1, j) = 2P(2m-1, j) - O_b(2m, j) \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, 2n) \quad (6)$$

由式(6)在式(4)中逐步回代,可得近似回代法重构图像  $O_b$  的其他像元.

进一步考虑到式(5)的近似存在误差  $\Delta_j$ ,即:

$$O(2m+1, j) = O(2m, j) + \Delta_j \quad (j = 1, 2, \dots, 2n), \quad (7)$$

代入式(4)可得近似回代法重构图像  $O_b$  与原始图像  $O$  对应像元之间存在关系(事实上,采用任何值近似第  $2m+1$  行都可以得到相同的结论,下错位情况亦同):

$$O_b(i, j) = O(i, j) + (-1)^i \frac{\Delta_j}{2}, \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, 2m; j = 1, 2, \dots, 2n)$$

即当错位率  $\alpha > 0$  时,  $O_b(i, j)$  像元误差与错位量大小没有关系,只与近似误差相关.

进一步分析式(8)可知,  $O_b$  奇数行与偶数行之间存在正负交错的误差  $\Delta_j/2$ ,对图像  $O_b$  各列的奇数行与偶数行分别求和:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m O_b(2i-1, j) = \sum_{i=1}^m O(2i-1, j) - \frac{m\Delta_j}{2} \\ \sum_{i=1}^m O_b(2i, j) = \sum_{i=1}^m O(2i, j) + \frac{m\Delta_j}{2} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, 2n) \quad (9)$$

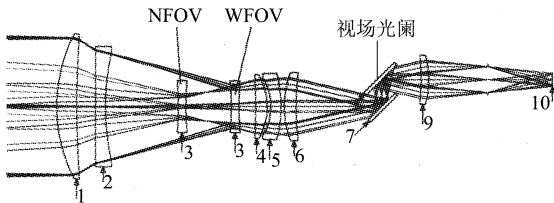


图3 典型  $288 \times 4$  扫描 IRFPA 的光学系统及其视场光阑位置  
Fig.3 Optical system and the field diaphragm of the typical  $288 \times 4$  scanning IRFPA

考虑到同一图像的相邻行之间像素灰度在统计意义上变化不会太快,因此,根据统计学原理,  $\sum_{i=1}^m O(2i-1, j)$  和  $\sum_{i=1}^m O(2i, j)$  应近似相等,由式(9)的两式相减可得误差  $\Delta_j/2$  近似解:

$$\left(\frac{\Delta_j}{2}\right)' = \frac{\sum_{i=1}^m O_b(2i, j) - \sum_{i=1}^m O_b(2i-1, j)}{2m} \quad (j = 1, 2, \dots, 2n) \quad (10)$$

对一系列热图像的模拟实验表明:在 MATLAB 编程中,若最大像元灰度归一化为 1,则用  $(\Delta_j/2)'$  近似  $\Delta_j/2$  的残差在  $10^{-4}$  个数量级左右,可忽略不计.即由  $O_b$  和(10)式求得的  $(\Delta_j/2)'$ ,代入式(8)得到亚像元图像  $O_s$ ,其与原始图像  $O$  已非常近似.

下错位时,过采样图像  $P$  由微扫描前欠采样图像  $C_1$  和微扫描后下错位欠采样图像  $C_3$  交错插值组成,其表达式为:

$$\begin{cases} P(2i-1, j) = [O(2i-1, j) + O(2i, j)]/2 \\ P(2i, j) = [(1-\alpha)O(2i, j) + O(2i+1, j) + \alpha O(2i+2, j)]/2 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, 2n) \quad (11)$$

由式(11)可得原始高分辨力图像  $O$  的表达式为:

$$\begin{cases} O(2i, j) = [2P(2i, j) - O(2i+1, j) - \alpha O(2i+2, j)]/(1-\alpha) \\ O(2i-1, j) = 2P(2i-1, j) - O(2i, j) \end{cases} \quad (i = m, m-1, \dots, 1; j = 1, 2, \dots, 2n) \quad (12)$$

根据近似回代法,用邻近像元对边界像元第  $2m+1$  行,  $2m+2$  行进行如下近似:

$$O(2m+2, j) \approx O(2m, j), O(2m+1, j) \approx O(2m, j) \quad (j = 1, 2, \dots, 2n) \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)并逐步回代可得近似法重构图像  $O_b$ .考虑到式(13)的近似存在一定的误差:

$$\begin{cases} O(2m+1, j) = O(2m, j) + \delta_j, O(2m+2, j) = O(2m, j) + \gamma_j \\ (j = 1, 2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (14)$$

代入式(12)可得原始图像  $O$ ,与近似法重构图像  $O_b$  各像元之间对应关系为:

$$O_b(i, j) = O(i, j) + (-1)^i \frac{(\delta_j + |\alpha| \gamma_j)}{2} \quad (i = 1, 2, \dots, 2m; j = 1, 2, \dots, 2n)$$

由式(15)可知,下错位时,  $O_b$  各像元误差不仅与近似误差  $\delta_j$  和  $\gamma_j$  相关,还与错位量  $|\alpha|$  相关,  $|\alpha|$  越大,近似法引进的误差越大.将  $O_b$  各列奇数行与偶数行分别求和并采用统计法即可求得各行误差  $\frac{(\delta_j + |\alpha| \gamma_j)}{2}$ ,误差消除后得到亚像元图像  $O_s$ .

## 2.2 算法处理过程

由于微扫描序列图像之间的位移比较小,通常采用梯度法<sup>[7]</sup>或光流法<sup>[8]</sup>进行位移估计,判断非均匀微扫描是上错位还是下错位,在确定错位模式的基础上,本文所研究提出的无边框亚像元热成像处理算法流程如下:

步骤 1:对垂直方向微扫描前后的欠采样图像进行交错插值,获得非均匀微扫描情况下的过采样图像 P;

步骤 2:在无边框视场光阑限制下,采用邻近像元近似边界像元,得到近似回代图像  $O_b$ ;

步骤 3:对重构图像  $O_b$  中近似回代引进的误差进行规律分析,由(10)式得到误差的近似解,带入(8)式进行消除,得到最终的亚像元图像  $O_s$ 。

以上为上错位时非均匀微扫描的无边框亚像元热

成像处理算法步骤,下错位时与此类似,此处不再赘述。

## 3 算法模拟、分析与比较

为了验证算法的性能,采用实际拍摄的  $240 \times 320$  大小热图像作为原始高分辨力图像  $O$ ,以探测器单元高度为两倍像元的  $120 \times 1$  阵列沿水平方向扫描积分,垂直方向上错位与下错位非均匀微扫描成像.分别进行过采样图像、近似回代图像及亚像元图像重构,并用评价参数峰值信噪比 PSNR<sup>[9]</sup> 和通用图像质量因子  $Q$ <sup>[10]</sup> 进行定量评价,其中  $Q$  取值范围为  $[0,1]$ ,值越小图像质量越差。

按照上错位量与下错位量的不同进行了多组实验,对过采样图像 P,带误差的近似回代图像  $O_b$  以及误差优化后亚像元图像  $O_s$  的评价参数如表 1 所示.分析表 1 可以看出:

表 1 微扫描上错位与下错位情况下的图像质量评价参数

Table 1 Evaluating parameters of the reconstructed images under above-dislocation and below-dislocation situations

错位率	评价参数	PSNR			Q		
		过采样图像 P	近似回代图像 $O_b$	亚像元图像 $O_s$	过采样图像 P	近似回代图像 $O_b$	亚像元图像 $O_s$
$\alpha > 0$	$\alpha = 0.2$	77.6626	73.0135	104.6195	0.9906	0.9737	1
	$\alpha = 0.4$	78.3756	73.0135	104.6195	0.9920	0.9737	1
	$\alpha = 0.6$	78.5166	73.0135	104.6195	0.9923	0.9737	1
	$\alpha = 0.8$	78.0309	73.0135	104.6195	0.9914	0.9737	1
$\alpha < 0$	$\alpha = -0.2$	75.4446	71.5757	104.6195	0.9844	0.9638	1
	$\alpha = -0.4$	74.2801	70.2341	104.6195	0.9795	0.9513	1
	$\alpha = -0.6$	73.1705	69.0132	104.6195	0.9736	0.9365	1
	$\alpha = -0.8$	72.1367	67.9091	104.6195	0.9665	0.9196	1

(1) 当上错位即错位率  $\alpha > 0$  时,不论错位量为多少,近似回代图像  $O_b$  和亚像元图像  $O_s$  的评价参数 PSNR 和  $Q$  值都各自对应相等,即近似回代法引进的误差与错位量无关,这与 2.1 的理论分析一致;

(2) 当下错位即错位率  $\alpha < 0$  时,随着错位率  $|\alpha|$  的增大,近似回代图像  $O_b$  的 PSNR 与  $Q$  值越来越小,表明近似法引起的误差随着错位率  $|\alpha|$  的增大而增大,究其原因,由于  $|\alpha|$  的增大,下错位欠采样图像  $C_s$  占据边界像元第  $O(2m+2, j)$  行的权重更大,因此引进的误差更多,与 2.1 中下错位的结论相符合;

(3) 即使在相同  $|\alpha|$  处,上错位与下错位的近似回代图像  $O_b$  也是不一样的,下错位时的  $O_b$  普遍要劣于上错位的  $O_b$ ,这是由于下错位不仅引进了第  $O(2m+1, j)$  行的误差,还引进了第  $O(2m+2, j)$  行的误差;

(4) 不论是上错位还是下错位情况,经过误差优化后的亚像元图像  $O_s$  具有相同的评价参数,即本文算法对错位量具有鲁棒性。

图 4 给出了  $\alpha = 0.4$  时的过采样图像、近似回代图像以及亚像元重构图像,各自的误差分布如图 5 所示.可以看出,由于近似回代误差的影响,图像  $O_b$  中引进了横向条纹,给图像蒙上了一层“阴影”,图像质量比过采样图像 P 更加恶化,但其误差分布存在一定的规律性(如图 5 所示),经过误差优化后的亚像元图像  $O_s$  分辨率明显提高,其误差接近于 0,即与原始图像高度近似。

为了观察下错位时错位量对近似回代法重构图像效果的影响,图 6 给出了不同错位率时的  $O_b$  图像,可以看出,随着  $|\alpha|$  的增加,图像中的误差更加明显,当  $|\alpha|$  超过 0.5 时,图像已难以辨别,但经过误差优化后的亚像元图像效果明显改善.由于在不同错位量情况下经过误差优化后都能取得相同的亚像元图像效果,因此,图中只给出了其中一帧  $O_s$  图像。

## 4 结论

对于扫描型热成像,成功实现了基于边框视场

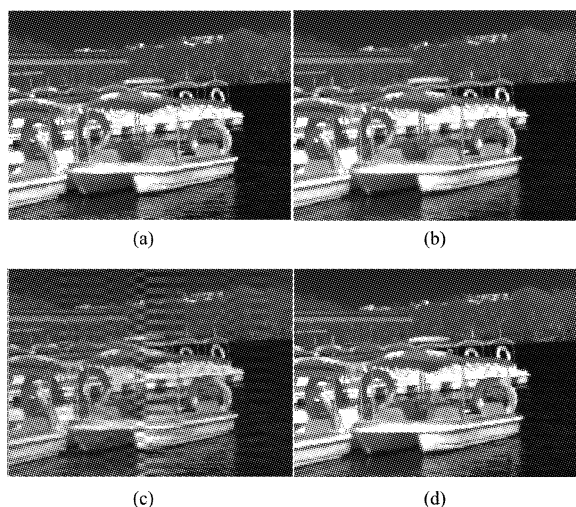


图4 错位率  $\alpha = 0.4$  时的图像处理效果 (a) 原始图像  $O$ , (b) 过采样图像  $P$ , (c) 近似回代图像  $O_b$ , (d) 亚像素图像  $O_s$ .  
Fig. 4 Results of dislocation rate  $\alpha = 0.4$  (a) original image  $O$ , (b) over-sampling image  $P$ , (c) approximating recursive image  $O_b$ , (d) sub-pixel image  $O_s$ .

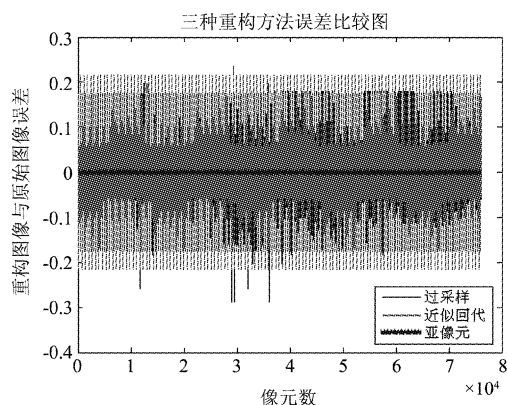


图5 错位率  $\alpha = 0.4$  时重构图像的误差分布  
Fig. 5 Error distribution of the reconstructed images under dislocation rate  $\alpha = 0.4$

光阑的均匀微扫描亚像素成像,但在实际应用中,边框视场光阑的实现具有一定的技术难度,并且微扫描位移量通常都会存在偏差。相比于从微扫描平台出发精确控制半像素位移,用软件处理获取错位率更为容易,本文给出了一种即使存在错位率也能获得高分辨图像重构的方法,从而可以简化系统的标定,并减小亚像素成像重构的误差。

## REFERENCES

[1] JIN Wei-Qi, ZHANG Wei-Qiang, WANG Chun-Yong, Analysis of second-generation thermal imaging system based on  $288 \times 4$  focal plane detector[J]. *Infrared Technology* (金伟其,张未强,王春勇. 基于  $288 \times 4$  焦平面探测器的二代热成像系统分析, *红外技术*), 2004, 26(2): 1-5.

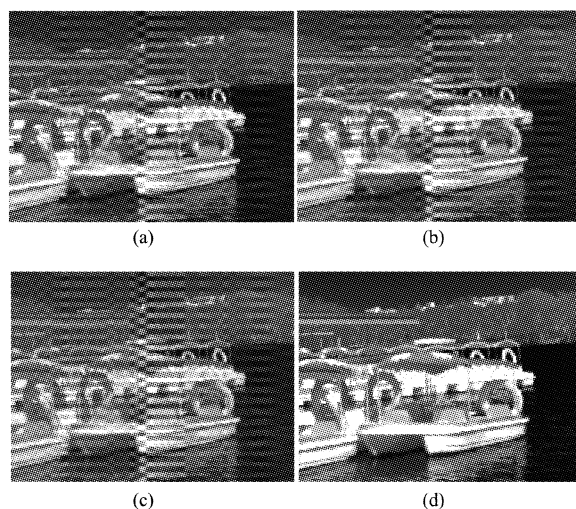


图6 下错位时不同错位量下近似回代重构及亚像素重构图像效果 (a)  $\alpha = -0.2$  时  $O_b$  图像, (b)  $\alpha = -0.5$  时  $O_b$  图像, (c)  $\alpha = -0.8$  时  $O_b$  图像, (d) 亚像素图像  $O_s$ .  
Fig. 6 Approximating recursive and sub-pixel images of different dislocation size under below-dislocation (a) image  $O_b$  of  $\alpha = -0.2$ , (b) image  $O_b$  of  $\alpha = -0.5$ , (c) image  $O_b$  of  $\alpha = -0.8$ , (d) sub-pixel image  $O_s$ .

- [2] Catherine-GP general-purpose thermal imager [EB/OL]. www.thalesgroup-optronics.com.
- [3] JIN Wei-Qi, WANG Chun-Yong, ZHANG Nan, et al. Study on sub-pixel processing algorithm for scanning FPA thermal imaging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金伟其,王春勇,张楠等,扫描型焦平面热成像系统的亚像素处理算法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 261-264.
- [4] Li Y Q, Jin W Q, Xu C, et al. A sub-pixel image processing algorithm of a detector based on staring focal plane array [J]. *Journal of China Ordnance*, 2008, 4(4): 259-267.
- [5] JIN Wei-Qi, CHEN Yi-Nan, WANG Xia. Scanning type sub-pixel thermal imaging algorithm taking account of detector filling rate and micro-scanning contra-position bias[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金伟其,陈翼男,王霞. 考虑探测器填充率及微扫描对位偏差的扫描型亚像素热成像算法. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(4): 308-312.
- [6] CHEN Yi-Nan. Research on image reconstruction algorithm for non-uniform/uncontrollable microscanning electro-optical imaging systems[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology. (陈翼男,非均匀/不可控微扫描光电成像图像重建算法研究. 北京:北京理工大学光电学院), 2009.
- [7] ZHAO Wen-Lei. Research on super-resolution restoration of the image sequence with displacement [D]. Qinghuangdao: Yanshan University. (赵文蕾. 基于互有位移序列图像的超分辨率复原技术研究. 秦皇岛:燕山大学), 2006.
- [8] Bouguet J Y. Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm[R]. Intel Corporation Microprocessor Research Labs.
- [9] Pappas T N, Sfranek R J. *Perceptual criteria for image quality evaluation* [M]. in Handbook of Image and Video Processing, 2000.
- [10] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index[J]. *IEEE signal processing letters*, 2002, 9(3): 81-83.