

# 基于微变焦法的超分辨率成像技术及实验研究\*

曹聚亮,吕海宝,李冠章,谭晓波

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**从空间域的角度分析了微变焦法的原理,微变焦过程可等效为改变每个光敏元所对应物辐射率分布区域的位置和大小,由此建立微变焦过程的空域模型为一个线性方程组,由该模型可描述观察图像和目标高分辨率图像之间的关系,并通过求解该方程组得到目标图像。最后做了面阵 CCD 的超分辨率成像实验,结果表明微变焦法可明显提高成像系统的分辨率。

**关键词:**超分辨率;成像系统;微变焦法;空域模型

中图分类号:TN391 文献标识码:A

## A Research on Spatial Model of the Superresolution Imaging by Micro-Zooming and Its Experiments

CAO Ju-liang, LU Hai-bao, LI Guan-zhang, TAN Xiao-bo

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The principle of micro-zooming is analyzed in the spatial domain. Micro-zooming is the method that changes imaging focal length of the optical system gradually to obtain a series of images of the same scene with different amplified multiples, and reconstruct a high resolution image through these images. It can be used to realize superresolution imaging of opto-electronic imaging systems. Micro-zooming imaging can be equivalent to change the area and position of the sensor element's corresponding object radiance distribution region, which are related to the magnification and the location of the sensor elements respectively. So the spatial model can be established and the relationship between the observed images and the ideal high resolution image can be given as linear equations. The high resolution image can be obtained by solving the equations. The experiment of the superresolution imaging of area-array CCD by micro-zooming is described in the end of the paper. It denotes that the resolution of the image increases markedly.

**Key words:** superresolution; imaging systems; micro-zooming; spatial model

目前,焦平面阵列光电成像系统的成像分辨率提高主要受探测器件本身分辨率的限制。当前提高数字成像系统分辨率的方法有<sup>[1]</sup>(a)提高探测器件光敏元数量,但会受加工工艺的限制,而且随着 CCD 像元数的增加,感光单元尺寸减小,器件的灵敏度会降低;(b)增加光学系统的成像焦距,提高放大倍数,但这以缩小视场和增加成像系统重量和体积为代价;(c)采用多块 CCD 几何拼接技术,缺点是拼接工艺要求高,而且增加了像平面面积,大大增加了光学系统的复杂度;(d)将多帧经过亚像素平移的图像重建为一帧高分辨率图像的微扫描(Micro-scanning)法,能够在保持视场的同时提高成像系统分辨率,可实现获取分辨率高于探测器件分辨率图像的超分辨率成像。

用微扫描法获取多帧亚像素平移图像的方法主要有几何分光多 CCD 成像法<sup>[2]</sup>(也称空间偏置成像法)、双折射晶体分光法、压电陶瓷驱动的 CCD 微位移法等,采用微扫描法的前提是必须保证足够高的平移精度,而该精度要求还会随着所需微扫描级数(即亚像素位移)的减小而成倍上升。若采用分光法,不仅光路复杂,而且分光后系统灵敏度降低,若采用压电陶瓷驱动的 CCD 微位移法,则实施高频振动小位移的机械装置非常复杂。

微变焦法为通过改变光学系统焦距获得同一目标多帧放大倍数不同的图像,然后由此重构高分辨率图像的技术。由于改变光学放大率只需控制镜片在光轴方向上的位移,通过变焦镜头即可实现,避免

\* 收稿日期:2004-05-10  
作者简介:曹聚亮(1976—),男,博士生。

了采用微扫描中控制水平、垂直两个方向位移的高精度机械装置 精度要求也不会随所需微变焦级数的减少和实际像素尺寸的减小而增加。

### 1 微变焦成像空域模型

文献[3]给出了一维条件下微变焦法连续频域混叠模型,把欠采样观察数据看作是理想信号发生频谱混叠后的结果,对混叠过程建模,然后通过解混叠得到理想信号的频谱。但对数字图像而言,其频谱域是离散的,当变焦放大倍数变化不是整数时,离散频谱在混叠过程中会发生错位,难以实现解混叠处理,若对其频谱进行插值处理,则空域图像会发生畸变,因此频域解混叠方法实用性不太好。

为此建立微变焦成像过程空间域模型。忽略微变焦过程中系统点扩展函数的变化,图像的照度分布可表示为[4]

$$K(x', y') = KO(x, y) ** h(x, y) \tag{1}$$

其中,  $O(x, y)$  为物的辐射率分布函数,  $K$  为光线经过成像系统的能量损失系数,  $h(x, y)$  为系统点扩展函数,符号“\*\*”表示二维卷积。相应的数字模型为

$$K(i, j) = KO(m, n) ** h(m, n) \tag{2}$$

其中,  $K(i, j)$  为探测器输出图像,  $O(m, n)$  为等效输入高分辨率图像,  $h(m, n)$  为系统离散点扩展函数。探测器某光敏元的输出可描述为该光敏元在等效输入高分辨率图像内对应点的某个邻域内像素值的加权平均,该邻域范围和权值由  $h(m, n)$  确定,故

$$K(i, j) = \sum_{k, l \in \Omega_{i, j}} W_{k, l}^{i, j} O(k, l) \tag{3}$$

其中,  $\Omega_{i, j}$  为光敏元  $(i, j)$  在输入图像中所对应区域内包含像素的序号集合,  $W_{k, l}^{i, j}$  为其权值。

经变焦后,模型为

$$K(i, j) = KO\left(\frac{m}{M}, \frac{n}{M}\right) ** h(m, n) = KO(m', n') ** h(Mm', Mn') \tag{4}$$

其中,  $M$  为光学系统放大倍数。

因此变焦过程等效为改变探测器光敏元所对应的输入高分辨率图像“相关区域”位置和面积。如图1所示,图中背景方格为等效输入高分辨率图像像素,灰色方框为某光敏元所对应的区域,分别为参考帧及放大倍数小于和大于1的情况。缩放倍数同变焦倍数有关,位置的移动则与该光敏元的位置有关。面积变化可等效为相应离散点扩展函数的缩放变化,见(4)式。

若没有系统点扩展函数的先验知识,则  $h(m, n)$  为输入等效高分辨率图像像素在探测器光敏元所对应区域内的归一化面积。因此,实际探测器第  $(i_1, j_1)$  个光敏元的输出可表述为

$$K(i', j') = \sum_{k, l \in \Omega_{i', j'}} W_{k, l}^{i', j'} O(k, l) \tag{5}$$

其中,  $\Omega_{i', j'}$  为光敏元  $(i', j')$  在输入图像中所对应区域内包含像素的序号集合;  $W_{k, l}^{i', j'}$  为等效输入图像第  $(k, l)$  个像素包含在光敏元  $(i', j')$  所对应区域内像素面积的归一化权值。因此,实际成像系统每个光敏元的输出可表示为输入图像像素的线性加权和。

对所有观察图像中的每个像元都可以列出上述方程,由此可得到一个稀疏线性方程组,求解该方程组即可得到输入高分辨率图像,从而实现超分辨率成像。

该稀疏方程组可能有无穷个解、惟一解或无解。理论上观察图像帧数为分辨率提高因子的平方时,方程组可确定惟一解,但考虑到实际观察图像噪声、模型参数和变焦参数的误差、量化误差等因素,往往要获取更多帧的观察图像,得到一个非相容超定方程组,然后通过求解其极小范数最小二乘解得到高分辨率图像。

图2为模拟变焦过程中成像像元位置示意图,五帧图像所对应的变焦倍数分别为:1, 0.9, 0.95,

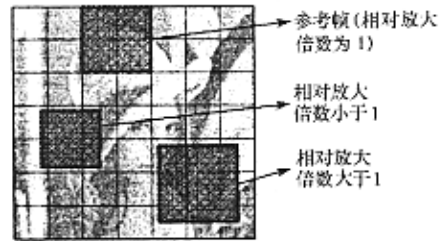


图1 微变焦过程中某光敏元的“物辐射相关区域”变化示意图

Fig.1 Corresponding region variety of an element during micro-zooming

1.05, 1.1。图中“ $\times$ ”为第一帧观察图像像元所在位置,设该帧为参考帧,“+”,“ $\nabla$ ”,“ $\square$ ”和“ $\star$ ”分别代表第 2~4 帧观察图像像元所在位置。其中(0,0)处为光轴位置,可见随着像元与光轴距离的加大,像元分布趋向均匀,但在光轴附近分布比较集中。因此光轴附近像元所在线性方程组的行相关性比较大,方程组的条件数比较大,从概率论的角度分析,对应解的置信度比较低。反之,在远离光轴的区域,像元分布更加均匀,方程组各行之间相关性小,对应解的置信度较高。因此从理论上讲,微变焦法对光轴上点的改进效果最差,距离光轴越远,效果越好,而且提高帧数有利于提高像元分布的均匀性。

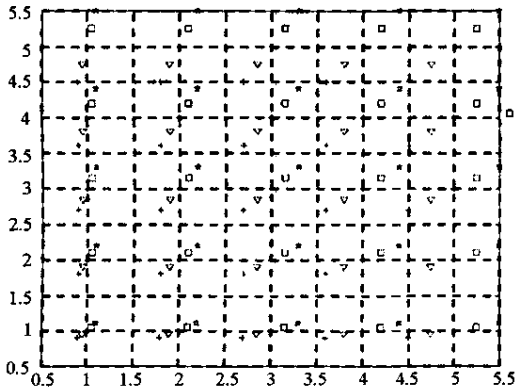


图2 模拟微变焦成像过程光敏元位置示意图

Fig.2 Position sketch map of the sensor elements during stimulant micro-zooming imaging

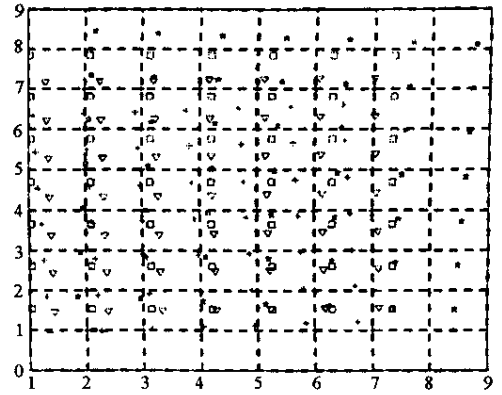


图3 实际微变焦成像过程 CCD 像元位置示意图

Fig.3 Position sketch map of the sensor elements during practical micro-zooming imaging

但在实际变焦成像过程中一般伴随着变焦电机的转动和变焦镜头的收缩,因此成像系统不可避免地存在微小的位移或旋转,而 CCD 的像元大小是  $\mu\text{m}$  级的,微小的位移和旋转也将引起成像点亚像元的移动,因此光轴附近的像元位置与理论上的位置会不同,可实现亚像元成像,如图 3 所示的实际成像过程中多帧图像的 CCD 像元位置。

另外,为保证成像过程中系统点扩展函数的一致性,变焦范围一般不可太大,根据镜头的不同,一般要限制在 1.5 以内。

由于目标图像为多帧图像经像素级信息融合的结果,因此可在一定程度上消除成像系统的随机噪声,提高成像质量。

## 2 实验结果

实验中使用的 CCD 像素数为  $2280 \times 1712$ ,对图像分辨率测试图进行拍摄共得到 21 帧观察图像,变焦范围约为 0.9~1,采用基于光流计算的金字塔形分层迭代算法计算出每一帧图像与参考图像之间的仿射变换参数,表 1 为部分图像的变换参数,其中  $A_1 \sim A_3, B_1 \sim B_3$  为仿射变换的六个参数, $M$  为相对焦距,根据配准参数可对观察图像中的每个像元列出形如(5)式的方程,得到一个大型稀疏非相容线性方程组,然后采用作者在文献[5]中提出的改进行处理迭代算法求解该方程组,得到其极小范数最小二乘解,即为目标高分辨率图像。

表1 微变焦实验仿射变换参数

Tab.1 Affine transform parameters in micro-zooming experiment

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$M$
1	1	0	0	0	1	0	1.0000
5	1.0237	-0.0005	-1.7461	0.0004	1.0239	-1.5797	0.9768
10	1.0543	-0.0006	-3.2153	0.0007	1.0548	-3.5349	0.9483
16	1.0903	-0.0007	-5.0215	0.0005	1.0912	-5.3024	0.9168
21	1.1209	-0.0009	-7.2970	0.0010	1.1219	7.3766	0.8917

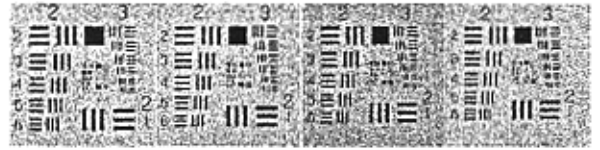
图4为实验结果,图中(a)为观察图像(b)为第14帧观察图像经双三次方插值放大后的结果和超分辨率重建结果(c)为其局部放大效果。可见图像分辨率提高了两到三级,而且图像更加平滑,这正是多帧图像信息融合对随机噪声有抑制作用的结果。由于模型参数估计、配准参数估计的误差不可避免,实际分辨率提高效果与理想效果还有一定的差距。

### 3 结束语

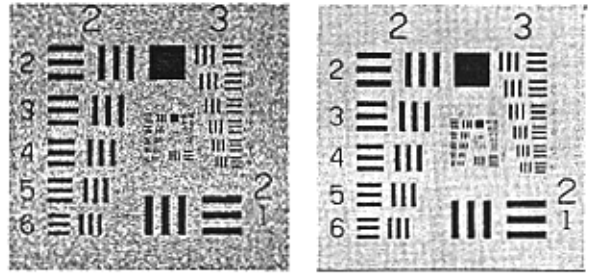
从空域角度分析,微变焦过程可等效为改变探测器光敏元所对应物辐射分布区域大小和位置,因此可以建立实际观察图像和虚拟高分辨率图像之间的数学模型为一个大型稀疏非相容性线性方程组,求解该方程组即可得到目标高分辨率图像,从而实现超分辨率成像。与其它超分辨率成像技术相比,微变焦法只需控制镜片在光轴方向上的位移,对配有变焦镜头的成像设备,对硬件不做任何改进即可通过微变焦实现超分辨率成像,因此具有一定的实用价值。

### 参考文献:

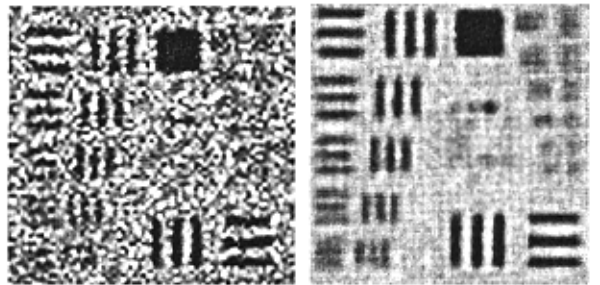
[1] 张平,王凌,冯华君,等.基于多次成像的分辨率提高算法研究[J].光子学报,2003,32(2):193-195.  
 [2] 刘新平,高瞻,邓年茂,等.面阵CCD作探测器的“亚像元”成像方法及实验[J].科学通报,1999,44(15):1603-1605.  
 [3] 张海涛,巩马理,赵达尊,等.实现超分辨率的微变焦法[J].物理学报,2001,50(8):1486-1491.  
 [4] Gaskill J D. Linear Systems, Fourier Transformations, and Optics[M]. John Wiley & Sons, Inc, 1978.  
 [5] Cao Juliang, Li Guanzhang, Lu Haibao, et al. A New Row Action Iterative Method and its Application in CCD Superresolution Imaging[A]. ISIST'04, 2004.



(a) 第1、7、14、21帧观察图像(局部)



(b) 双三次方插值放大和超分辨率重建结果



(c) b图局部

图4 超分辨率成像实验结果

Fig.4 Experiment results of micro-zooming imaging

