

文章编号:1007-2780(2011)06-0841-06

## 基于 CCD 阵列错排的图像差分超分辨率重建方法

张 元, 钟 兴, 金 光\*, 王天聪

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: zhangyuanfresh@126.com)

**摘 要:** 借助阵列错位排列技术通过将多条线阵 CCD 按特定方式错位排列, 可以实现在不提高光学成像系统参数要求和减小 CCD 像元尺寸的前提下提高图像分辨率的目的, 提出了一种利用 4 条线阵 CCD 的错排将图像两个方向分辨率均提高 1.5 倍的图像超分辨率方法, 利用循环方法解决了单次运算量大的问题。通过数字仿真实验验证了该方法的有效性, 搭建了仿真成像平台进行实验。对鉴别率板的成像结果表明, 图像分辨率近似提高为原始的 1.42 倍, 与提高 1.5 倍的理想情况相差不大。同时, 从图像所包含信息量的角度, 利用图像的信息熵进行了评价, 说明了重建后图像的信息量相对原始图像确有了提高。

**关 键 词:** CCD 采样; 阵列错排; 超分辨率重建

中图分类号: TP751 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20112606.0841

## Super Resolution Reconstruction of Image Difference Based on CCD Staggered Arrays

ZHANG Yuan, ZHONG Xing, JIN Guang\*, WANG Tian-cong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China; E-mail: zhangyuanfresh@126.com)

**Abstract:** The image resolution can be improved without increasing the requirement of optical imaging systems's parameters or decreasing the size of CCD pixel by staggered arrays technology, which arranges several CCDs in a specific mode. In this paper, an image super resolution method of improving the image resolution for 1.5 times both in two directions by 4 linear arrays staggered based on this technology was presented, which avoids the large computation in a single time by using circulation method. This method is proved effectively by the digital simulation, and a simulated experiment platform was constructed to test its feasibility. The image resolution is improved about 1.42 times of the unreconstructed image according to the imaging experiment of resolution chart, which is closed to 1.5 times in ideal case. Also, the reconstructed and unreconstructed images was evaluated by the image information entropy, which proves that the reconstructed image contains more information.

**Key words:** CCD sampling; staggered arrays; super resolution

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-04-25

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA7020103)

作者简介: 张元(1985—), 男, 吉林省吉林市人, 硕士, 主要从事空间光学的研究。

\* 通讯联系人, E-mail: jing@ciomp.ac.cn

## 1 引 言

近年来,随着民用和军用遥感图像分辨率需求的不断提高以及空间相机朝着小型化方向发展,轻小型和高分辨率空间相机已经成为世界各国航天界在空间领域研究的热点问题<sup>[1-5]</sup>。为了获得高分辨率遥感图像,常规的方法有减小 CCD 像元尺寸、增大相机焦距、降低轨道高度等。但是,这些常规方法会造成成本和尺寸上的浪费。更为有效的解决方案就是通过超分辨率重建技术提高图像的空间分辨率,其优势在于可在不改变光学系统及成像条件下得到更高分辨率的图像。这类技术的共同点是利用 CCD 的交错排布实现亚像元成像。再通过重建算法得到高分辨率图像。其中比较有代表性的是法国 SPOT5 卫星中采用的超模式梅花采样模式<sup>[6]</sup>,借助这一技术手段,SPOT5 可以同时获得 5 m 和 3.5 m 分辨率的遥感图像。但是,因为后续的插值算法较为复杂,星上计算机不能完成后续处理工作,因此只能将获得的低分辨率图像下载到地面再进行处理,这给数据传输造成了较大的压力,而一种通过图像差分方法实现图像超分辨的技术则可以有效地避免这一问题<sup>[7]</sup>。图像差分技术是通过将多条线阵 CCD 按一定的规律错位排列来获得多幅低分辨率图像,依据这些低分辨率图像与高分辨率图像各像素灰度值之间的对应关系,重构出更高分辨率的图像<sup>[8-9]</sup>,这类方法最早由日本的学者 K. Aizawa 等提出<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11]</sup>给出了一种利用移动 16 次 CCD 实现分辨率提高 2.5 倍的方法,但其配准精度的要求控制在 1/5 个像元,现有的 CCD 拼接工艺只能保证在 5  $\mu\text{m}$  左右,因此该方法工程实现难度较大,而且运算量大,不适合空间遥感等方面的应用。文献<sup>[12]</sup>提出一种通过移动成像镜头来获取序列图像,再利用基于像素灰度值独立方程算法重构高分辨率图像的方法,有效地提高了处理速度,但是文章中没有考虑对于大相对孔径长焦距镜头的微扫描精度的问题,难于实际工程化。

本文给出一种基于 4 条线阵 CCD 按照特定方式排列的方法,将两个采样方向分辨率均提高了 1.5 倍,利用循环方法解决了单次运算量大的问题,并结合数字和半实物成像仿真实验验证了算法。

## 2 差分成像超分辨率重建方法

### 2.1 差分成像超分辨率重建原理

假设预计得到的图像  $X$  分辨率为  $N \times N$ , 对应像元尺寸为  $d \times d$ 。本文所提出方案的线阵 CCD 排列方式如图 1 所示。图 1 中 A、B、C、D 表示像元尺寸为  $(3/2)d$  的线阵 CCD; A 表示作为基准的线阵 CCD; B 表示仅与 A 在穿轨方向错开  $d/2$  且在沿轨方向错开  $d$  的一片线阵 CCD; C 表示仅与 A 在穿轨方向错开  $(n+1/2)d$  的一片线阵 CCD; D 表示与 A 在沿轨方向错开  $d/2$  且在穿轨方向错开  $(n+1/2)d$  的一片线阵 CCD。图 1 中  $X_i$  表示图像  $X$  的未知像元的灰度值,  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$  表示 4 条线阵上各个像元的灰度值。

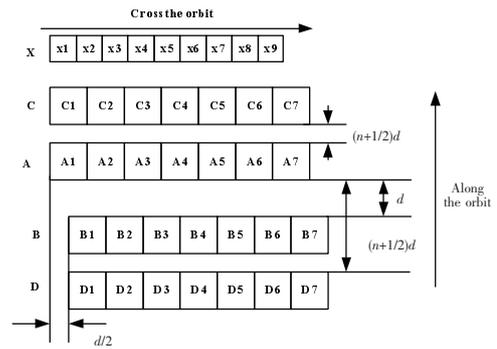


图 1 线阵 CCD 排布示意图

Fig. 1 Arrangement diagrammatic of linear array CCDs

如果只使用线阵 A 对分辨率为  $N \times N$  的图像  $X$  进行采样,则按照 CCD 采样原理,只能获得分辨率为  $2N/3 \times 2N/3$  的图像。如果将 A、B、C、D 错位排列获得 4 幅低分辨率图像,再利用重构算法重建出与图像  $X$  具有相同分辨率  $N \times N$  的图像,则相当于将直接采样得到原始图像的分辨率提高了 1.5 倍。利用如图 1 所示方式排布的 4 条线阵 CCD 进行推扫成像,所得到的等效面阵 CCD 示意图如图 2 所示。图 2 中给出的是线阵 A、B、C、D 的 4 个像元推扫 4 帧成像的示意图。

从图 2 可以看出,对于由线阵 A、B、C、D 推扫形成的各个等效面阵,它们之间的相对位置关系以  $2 \times 2$  个像元为一个最小循环单位,即对应于各条线阵每 2 个像元的 2 帧。重建过程实际上就是要根据 A、B、C、D 各个像素点的灰度值求解出  $X$  各个像素点的灰度值。如果对  $X$  及 A、B、C、D 上的各个像元的灰度值逐帧进行编号,例如  $X$ 、A、

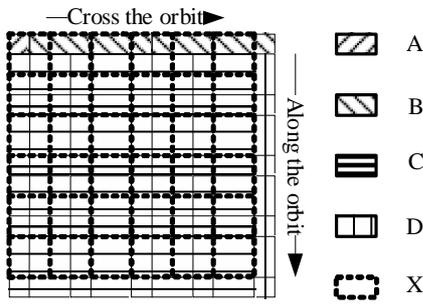


图 2 线阵 CCD 推扫成像等效面阵示意图

Fig. 2 Equivalent focal plane of push-broom imaging of linear array CCDs

B、C、D 第一帧的第一个像元灰度值分别为  $X_{11}$ 、 $A_{11}$ 、 $B_{11}$ 、 $C_{11}$ 、 $D_{11}$ ，第二帧的第一个像元灰度值分别为  $X_{21}$ 、 $A_{21}$ 、 $B_{21}$ 、 $C_{21}$ 、 $D_{21}$ ，第一帧的第二个像元灰度值分别为  $X_{12}$ 、 $A_{12}$ 、 $B_{12}$ 、 $C_{12}$ 、 $D_{12}$ ，以此类推，则可将所有的像元灰度值表示出来。

从 CCD 的采样原理来看，CCD 像元的灰度值是该像元内光能量的平均值，则根据图 2 所示的 X 与线阵 A、B、C、D 的几何关系，可以得到如下方程组：

$$\begin{cases} A_{11} = 4/9(X_{11} + 0.5X_{12} + 0.5X_{21} + 0.25X_{22}) \\ A_{21} = 4/9(0.5X_{21} + 0.25X_{22} + X_{31} + 0.5X_{32}) \\ A_{12} = 4/9(0.5X_{12} + X_{13} + 0.25X_{22} + 0.5X_{23}) \\ A_{22} = 4/9(0.25X_{22} + 0.5X_{23} + 0.5X_{32} + X_{33}) \\ B_{11} = 4/9(0.5X_{11} + X_{12} + 0.25X_{21} + 0.5X_{22}) \\ B_{21} = 4/9(0.25X_{21} + 0.5X_{22} + 0.5X_{31} + X_{32}) \\ B_{12} = 4/9(X_{13} + 0.5X_{14} + 0.5X_{23} + 0.25X_{24}) \\ B_{22} = 4/9(0.5X_{23} + 0.25X_{24} + X_{33} + 0.5X_{34}) \\ C_{11} = 4/9(0.5X_{11} + 0.25X_{12} + X_{21} + 0.5X_{22}) \\ C_{21} = 4/9(X_{31} + 0.5X_{32} + 0.5X_{41} + 0.25X_{42}) \\ C_{12} = 4/9(0.25X_{12} + 0.5X_{13} + 0.5X_{22} + X_{23}) \\ C_{22} = 4/9(0.5X_{32} + X_{33} + 0.25X_{42} + 0.5X_{43}) \\ D_{11} = 4/9(0.25X_{11} + 0.5X_{12} + 0.5X_{21} + X_{22}) \\ D_{21} = 4/9(0.5X_{31} + X_{32} + 0.25X_{41} + 0.5X_{42}) \\ D_{12} = 4/9(0.5X_{13} + 0.25X_{14} + X_{23} + 0.5X_{24}) \\ D_{22} = 4/9(X_{33} + 0.5X_{34} + 0.5X_{43} + 0.5X_{44}) \end{cases} \quad (1)$$

上述方程组 16 个方程含有 16 个未知量，此方程组有惟一解。将公式(1)写成矩阵向量积的形式

$$MX = N \quad (2)$$

式中： $M$  为系数矩阵； $X$  为  $X_{ij}$  按辞书式排列形成

的列向量，为所求； $N$  为  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $C_{ij}$ 、 $D_{ij}$  按辞书式排列形成的列向量。

其中  $M$  不随像元位置变化而变化，只决定于采样模式。采样模式固定了， $M$  就是固定的，而且  $M$  矩阵的逆  $M^{-1}$  也是可求的。于是式(2)可以写为

$$X = M^{-1}N \quad (3)$$

其中  $M^{-1}$  也是固定的。

根据式(3)即可求出  $X$ ，对  $X$  进行二维排布即得到高分辨率图像。

### 2.2 差分成像超分辨率重建流程

本文提出的 4 条线阵 CCD 排布方式，是以每条线阵 CCD 的 2 个像元的 2 帧采样为一个循环单位，因此将此循环单位作为一个最小处理单元。单次处理的像元数越少，对硬件处理能力的要求就越低，因此更适用于星上实时处理应用<sup>[13]</sup>。

差分成像超分辨率重建的流程如图 3 所示。

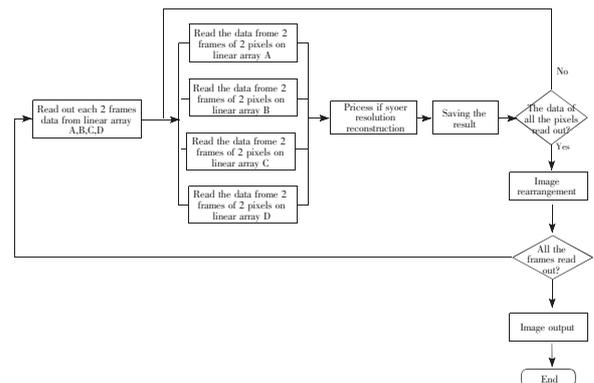


图 3 差分成像超分辨率图像重建流程

Fig. 3 Flow chart of super resolution reconstruction of image difference

将线阵 A、B、C、D 的 2 帧灰度数据作为一次循环处理过程。在一次循环中，首先读取线阵 A、B、C、D 上对应的相邻 2 个像元的灰度数据作为原始输入数据，将输入数据利用上一节所论述的算法进行处理，将处理结果暂时存储起来。判断线阵的所有像元的灰度数据是否都读出了，如果未读出完毕，继续读取下 2 个像元的灰度数据进行处理；如果读出完毕，则按照对应顺序将所有像元对应处理后的灰度数据进行重排，完成这 2 帧灰度数据处理。重复此过程，可将所有帧的灰度数据处理完毕，逐帧进行排列即得到超分辨率重建后的图像。

这种方法的优势在于模型比较简单, 单次循环运算量小。一次循环过程就是求解公式(3)的过程,  $M^{-1}$  是固定的, 并不发生变化, 因此在一次循环中所涉及到的运算只有 64 次乘法和 64 次加法。

### 3 数字仿真实验

为了验证本文提出的超分辨率图像重建方法的可行性, 利用 MATLAB 软件进行了数字仿真

实验。

选取一幅分辨率为  $234 \times 234$  的光栅图像作为实验对象, 假定图像单个像素对应的 CCD 像元大小为  $d/2 \times d/2$ , 如图 4 中(a)所示。按照本文所提出的采样模式, 模拟像元尺寸为  $(3/2)d \times (3/2)d$  的 CCD 采样得到的 4 幅低分辨率  $78 \times 78$  的图像分别如图 4 中(b)、(c)、(d)、(e)所示。

将图 4 中(b)、(c)、(d)、(e)作为输入, 利用本

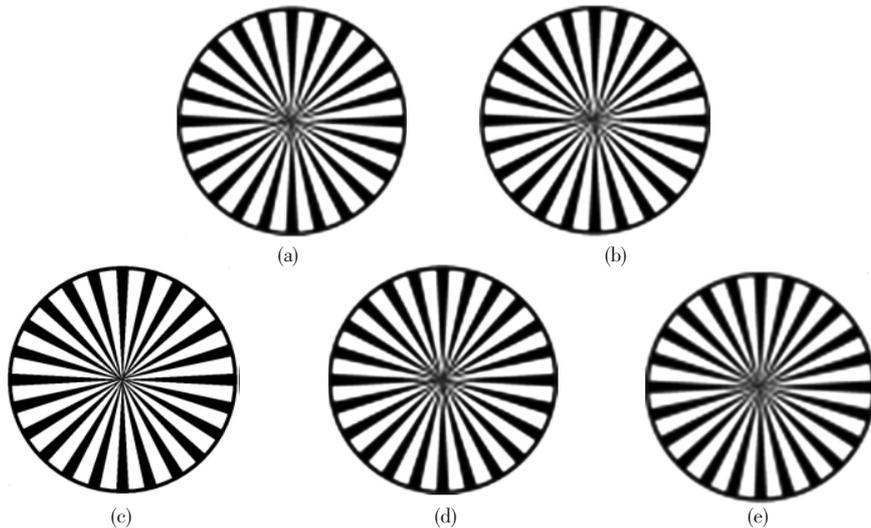


图 4 目标图像及仿真采样后的低分辨率图像

Fig. 4 Target image and the low resolution images after sampling simulation

文提出的算法进行重建, 所得到的处理结果如图 5(a)所示, 图像分辨率为  $117 \times 117$ 。为了与重构结果对比, 模拟了像元尺寸为  $d \times d$  的 CCD 采样结果, 如图 5(b)所示, 分辨率同样为  $117 \times 117$ 。

对比图 5(a)与图 4(b)、(c)、(d)、(e), 可以看到随着图像分辨率的提高, 图像的高频信息得到了更充分的表达, 扇形光栅图的中央区域解译程

度更高; 对比图 5(a)和(b), 可以发现二者的解译程度近似, 只是由重建得到的图 5(a)边缘有锯齿状现象。

## 4 仿真成像实验

### 4.1 实验流程

因为 CMOS 和 CCD 在采样原理上是相同的, 同时考虑到实验室中实现线阵推扫相对比较困难, 在成像实验中, 我们用面阵 CMOS 直接对目标成像的方式代替线阵 CCD 的推扫成像方式。为了仿真线阵 CCD 的错位  $d/2$  排布, 在本实验中将 CMOS 的一个像元当作半个像元处理, 然后利用不同的面阵 CCD 信号读出策略模拟 4 条线阵 CCD 的扫描成像。

整个成像实验平台由鉴别率板(成像目标)、平行光管、成像光学系统、CMOS 相机、信号采集系统 5 部分组成, 实验现场图如图 6 所示。CMOS 相机的像元大小为  $8 \mu\text{m}$ , 像元个数为  $508 \times 380$  个。

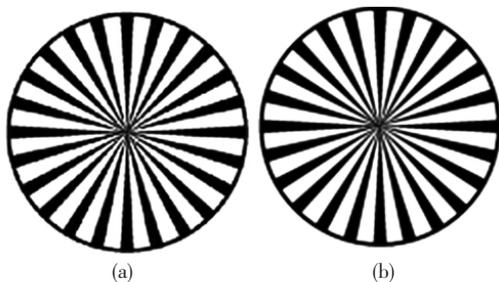


图 5 重建得到的高分辨率图像及仿真采样得到的同样分辨率图像

Fig. 5 Reconstructed high resolution image and the simulated image after sampling simulation at the same resolution

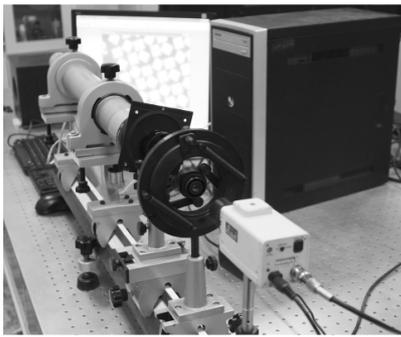


图 6 仿真成像实验现场图

Fig. 6 Photo of imaging simulation experiment field

将鉴别率板放置于平行光管的焦点位置,用两个镜头组成的望远系统正对着平行光管成像,在望远系统的焦面位置放置 CMOS 相机接收前方望远系统所成的像,由搭建于 PC 机平台的信号采集系统进行处理。

#### 4.2 实验结果及分析

我们将鉴别率板作为成像对象,按本文提出的采样模式进行了成像实验,得到的 4 幅原始低分辨率图像分别如图 7(a)、(b)、(c)、(d) 所示,重建后的图像如图 7(e) 所示。

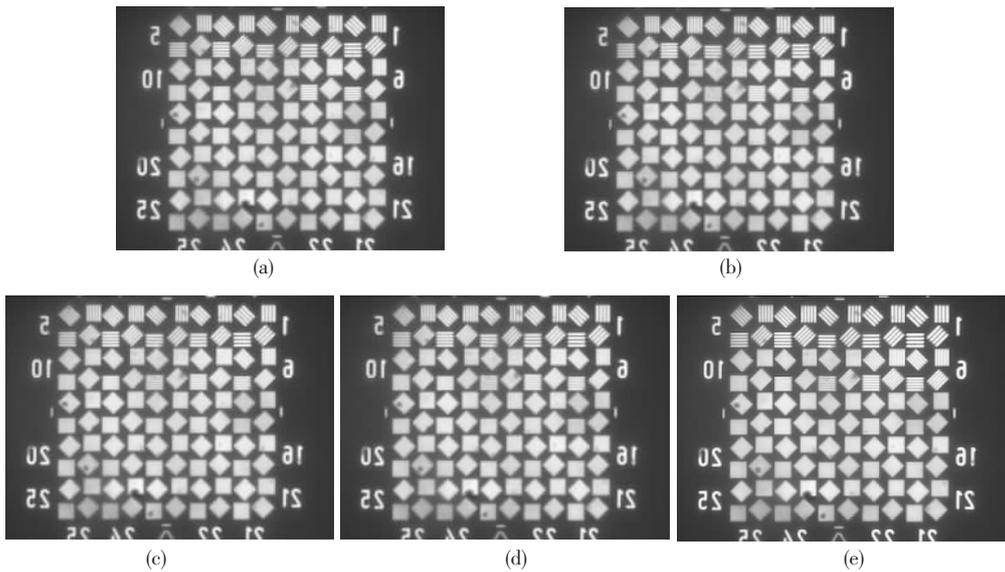


图 7 实际采样得到图像及重建后的图像

Fig. 7 Images after actual sampling and the reconstructed image

图 8(a)为图 7(a)中 5 号线对的放大图,图 8(b)为图 7(e)中 7 号线对的放大图。可以看到二者具有近似的清晰程度,因此处理后的图像相对于原始图像分辨率近似提高了  $7/5(\approx 1.4$  倍),与理论计算得到的结果(1.5 倍)非常接近。

为了更加客观地对图像的分辨率做出判断,使用图像的信息熵作为客观评价标准。图像的信息熵表示为图像灰度级集合的比特平均数,也描述了图像信源的平均信息量。信息熵越高,表明图像所包含的平均信息量越多<sup>[7]</sup>,因此这里使用图像的信息熵作为评价函数。设图像的灰度级为  $n$ ,像素灰度用  $x_i$  表示,若  $p(x_i)$  为各灰度级出现的概率,则图像的信息熵  $H$  的定义<sup>[14]</sup>为

$$H = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log(x_i) \quad (4)$$

在搭建的实验平台上做了两组实验,对原始

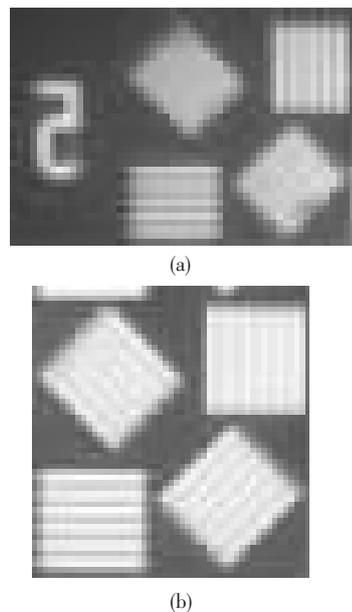


图 8 图 7 中局部放大图

Fig. 8 Local enlargement of Fig. 7

图像和处理后的图像分别按照公式(4)计算了图像的信息熵,得到的结果如表 1 所示。

从表 1 的数据可以看出,相对于原始图像,重建图像的信息熵都高于原始图像的信息熵,说明处理后的图像的平均信息量高于原始图像的平均信息量。

表 1 原始图像和重建后图像的信息熵

Table 1 Information entropys of the original image and the reconstructed image

信息熵	实验 1	实验 2
原始低分辨率图像	7.297 4	7.325 0
重建后高分辨率图像	7.369 2	7.347 5

## 5 结 论

基于阵列错排方法,提出了一种通过将 4 条线阵 CCD 按特定方式错位排列的推扫采样模式,

将图像分辨率在两个方向均提高了 1.5 倍。这种方法具有易于工程实现、单次循环运算量低的优点。通过计算机仿真和仿真成像实验,验证了该方法的可行性和有效性。在对鉴别率板成像实验中,重建后图像的分辨率提高为原始低分辨率图像的 1.4 倍,与理论提高倍数 1.5 倍近似,同时通过图像信息熵的计算,更为客观地证明了重建后的信息量高于原始低分辨率图像的信息量。

此方法的工程化对 CCD 搭接装配工艺提出了较高要求,但根据现在的工艺水平基本可以实现。另外,如果能够准确测量出多条 CCD 装配后的错位大小,则可以通过调整系数矩阵  $M$  进行调节而不影响整个处理流程,具有一定的鲁棒性。当然,此方法的处理结果并不十分理想,存在着较明显的边缘问题,解决这个问题将是下一步工作的重点,拟通过图像滤波方法实现。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵变红,何斌,杨利红,等. TDI-CCD 图像固有条带噪声的消除方法及实现[J]. 液晶与显示,2010,25(5):752-758.
- [2] 刘妍妍,李国宁,张瑜,等. 光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J]. 液晶与显示,2010,25(5):759-753.
- [3] 李丙玉,王晓东. CCD 视频信号集成处理器的暗电平自动校正[J]. 液晶与显示,2010,25(6):879-883.
- [4] 贾建禄,王建立,郭爽,等. 基于 Camera Link 的高速图像采集处理器 [J]. 液晶与显示,2010,25(6):914-918.
- [5] 王德江,匡海鹏,周刚,等. 一种红外探测器的图像采集系统 [J]. 液晶与显示,2009,24(3):429-433.
- [6] Seguela D, Fratter C, Munier P. SPOT5 system [J]. *Proc. SPIE*, 1999,6:212-220.
- [7] 杨爱萍,侯正信,王成优,等. 全相位内插交错采样超分辨率融合 [J]. 计算机工程与应用,2009,45(8):16-19.
- [8] 胡福生,金光,鲍赫. 基于多帧"差分"图像的分辨率提高算法 [J]. 光电工程,2007,34(1):88-96.
- [9] 徐美芳,刘晶红. 基于边缘保持的航拍图像凸集投影超分辨率重建算法[J]. 液晶与显示,2010,25(6):873-878.
- [10] Aizawa K, Komatsu T. A scheme for acquiring very high resolution images using multiple cameras [C]//*ICASSP-92*, San Francisco: IEEE, 1992: 289-292.
- [11] 王凌,张平,冯华君,等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析法[J]. 光电工程,2003,30(3):62-65.
- [12] 郑臻荣,郭功剑,刘旭,等. 像素灰度值独立方程重构高分辨力图像 [J]. 光电工程,2009,36(5):66-71.
- [13] 王任华. 自动对焦算法研究 [J]. 光电工程,2000,27(4):11-13.
- [14] 余英林. 数字图像处理与模式识别 [M]. 广东:华南理工大学出版社,1990:91-94.