

《航空相机技术》专题文章导读

丁亚林

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

航空遥感是获取地面信息的重要手段,航空相机作为航空遥感器的主要载荷形式之一,被世界各国广泛用于资源普查、地形测绘、军事侦察等许多领域。航空相机按成像介质可分为胶片型和 CCD 传输型两类;按成像方式又可分为推扫式、画幅式和全景式(摆扫式)相机。

世界发达国家(如美国、英国等)从 20 世纪初开始研制以胶片为信息载体的航空相机。早期的相机焦距较短、载片量小、画幅窄、地面分辨力低;随着科学技术的发展和对航空相机需求的牵引,20 世纪 70 年代,长焦距、大载片量、宽画幅、地面分辨力高的航空相机相继面世。至 20 世纪 80 年代,国际先进国家的胶片型相机已经发展至相当高的水平。而 CCD 探测器技术的日益成熟,推动了传输型相机的发展,20 世纪 80 年代,发达国家开始研发 CCD 实时传输型相机,至今已发展至很高的水平,且有迅速发展的势头。

胶片型相机照相分辨率高,实时性差;CCD 传输型相机照相分辨率较胶片型低,但实时性强。因此,目前处于两种介质形式相机共存的态势。

影响相机成像质量因素较多,主要有:设计、制造误差;装调、检测误差;载机运动(前向移动、姿态改变、照相距离改变、冲击振动等)引起的误差;相机所处的环境条件(温度、压力)引起的误差;相机成像过程中运动(扫描、调焦、补偿运动等)引起的误差,故保证相机的成像质量需采用多种措施。

本专栏的 5 篇文章属于航空相机技术的内容,从不同的角度给出保证相机成像质量所采取的技术与方法,包括亚像元的 CCD 几何超分辨方法,航空相机减振结构,航空相机自动检焦方法,全景式航空相机的扫描角研究和全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法等。

《亚像元的 CCD 几何超分辨方法》一文提出了亚像元的 CCD 几何超分辨方法:两片线阵 CCD 集成在同一器件中,在线阵方向上错开半个像元,同时读出时间减半,通过交织重组图像数据来合成高分辨率图像。对双线性插值方法及亚像元成像方法进行了仿真,并定性定量地分析两种方法的效果。结果表明,两组仿真图像中的 PSNR 比双线性插值图像分别高出 1.486 4 dB 和 2.207 0 dB。该方法可以显著地减轻欠采样引起的图像模糊,且实时性优于双线性插值方法。

《新型航空光学遥感器减振结构》一文,设计了一套吊装式减振系统,对该系统进行了仿真分析与试验验证。实验结果表明,该减振结构适合在较小的安装空间下使用,可适应工作环境中宽频带、大幅值的随机振动要求,能够满足光学遥感器安装与隔振的要求,在 10~2 000 Hz 频带范围内减振系统的传递率为 0.3。

《航空相机的自准直自动检焦方法研究》一文,针对航空相机在空中工作时,因温度、大气压力、照相距离变化引起光学系统的离焦现象,设计了一种利用自准直原理实现自动检焦的结构,分析了光栅常数与反射镜摆扫速率、接收元件响应时间的关系,研究了光栅的刻线方向在焦平面上的摆放位置 and 不同光源参数对检焦精度的影响。试验结果表明,自动检焦焦平面位置与实验室光学标定的焦平面位置偏差 $< 1/3$ 半焦距,满足成像要求,并在动态飞行试验中获得了良好的图像。

《全景式航空相机的扫描角研究》一文,提出了一种根据扫描角、扫描起始角和目标倾斜角之间关系推导扫描角的计算方法,给出了目标倾斜角与扫描起始角和扫描角之间的关系图。使用结果表明,这种方法确定的扫描角起始角和扫描角能使所成图像满足重叠率的要求,给定目标大多处于条带覆盖区域的中间,覆盖区域宽。该算法计算简单,适合在实际的工程设计中采用。

《TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法研究》一文,提出了一种基于定点数字信号处理器的控制系统,以实时实现前向像移的补偿算法。文章讨论了数字伺服控制系统中的补偿精度、算法选择、相位计算、时间约束等问题,给出了一种适合于工程实际的硬件结构与软件流程。实验结果表明,速度环的稳速误差为 0.85%,带来的像移为 0.425 μm ,位置环的归位时间为 0.8 s,满足相机成像要求。

文章编号 1004-924X(2008)12-2447-07

亚像元的 CCD 几何超分辨方法

徐正平^{1,2},翟林培¹,葛文奇¹,赵秀影^{1,3},刘妍妍^{1,2},耿文豹^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039;3. 空军航空大学,吉林 长春 130022)

摘要:为了在现有 CCD 像元尺寸的基础上提高 CCD 像元分辨力,对 CCD 几何超分辨问题进行了研究。从研究现状入

收稿日期:2008-06-06;修订日期:2008-08-15.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. ZJ99130B)

手,给出了现有算法及其不足,建立了亚像元超分辨成像数学模型,提出了亚像元的 CCD 几何超分辨方法。该方法将两片线阵 CCD 集成在同一器件中,在线阵方向上错开半个像元,同时读出时间减半,最终交织重组图像数据,以合成高分辨率图像。利用 MATLAB 7.0.1 软件对双线性插值方法及亚像元成像方法进行了仿真,并定性定量地分析了两种方法的效果。结果显示:亚像元方法合成图像分辨率约为低分辨率图像的 2 倍,且两组仿真图像中的 PSNR 比双线性插值图像分别高出 1.486 4 dB 和 2.207 0 dB。该方法可以显著地减轻欠采样引起的图像模糊,且实时性优于双线性插值方法。

关键词:电荷耦合器件;亚像元;几何超分辨

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A

CCD geometric superresolution method based on subpixel

XU Zheng-ping^{1,2}, ZHAI Lin-pei¹, GE Wen-qi¹,
ZHAO Xiu-ying^{1,3}, LIU Yan-yan^{1,2}, GENG Wen-bao^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*;
3. *Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

Abstract: In order to enhance the resolution of CCD pixel while keeping pixel dimension, the problem of CCD geometric superresolution is researched. Beginning with the actuality of superresolution, the existing methods and their shortcomings are presented, and a mathematical model of the subpixel superresolution is established. A method to improve the geometric resolution of CCD based on subpixel is presented, in which two linear CCDs staggered by half dimension of the pixel in the line direction are integrated in one component. When operated, the reading out time is reduced to half; At last, the image data is interweaved to synthesize a high resolution image. Two methods, bilinear interpolation and sub-pixel imaging, are simulated with the software MATLAB7.0.1. The qualitative and quantitative analysis are given. The simulation results show that with sub pixel imaging method, the resolution of synthesized image is twice as large as that of low resolution image, and the PSNRs in the two groups of simulating images are enhanced by 1.486 4 dB and 2.207 0 dB compared with that in bilinear interpolated image. Sub-pixel imaging method could mitigate greatly the image blur induced by under sampling, and the elapsed time is less than the bilinear interpolation method.

Key words: Charge Coupled Device(CCD); subpixel; geometric superresolution

1 引言

CCD(Charge Coupled Device)是由诸多像元排列而成的。像元分辨力通常由 GSD(Ground Sampled Distance)表示,在理想光学系统及忽略噪声的情况下,GSD 与空间物体到光学镜头的距离 R 和 CCD 像元尺寸 a 的乘积成正比,与光学系统焦距 f 成反比。因此,提高 CCD 像元分辨力最直接的措施是增大光学系统的焦距 f 或减小 CCD 像元尺寸 a 。但光学系统焦距的增大会带来

设计难度增加、相机体积和重量加大以及费用增高等难题;而由于物理结构、制造、灵敏度及信噪比等因素的限制,CCD 器件,尤其是红外 CCD 像元尺寸也不能做得太小。如何在保持光学系统焦距及像元尺寸不变的基础上提高 CCD 成像分辨力,即所谓的 CCD 几何超分辨问题。

CCD 几何超分辨可从软件、硬件的角度来实现。软件方法多采用插值算法,该方法只能从低分辨率图像中提取有限的冗余信息,分辨率提高能力受到限制^[1-4]。为此,需要改进硬件结构以获得更多的图像冗余信息。富士公司提出了“Su-

per CCD”的方案:采用蜂巢式结构,借助于八边形几何结构和间断排列,争取最大限度的 CCD 有限面积利用率^[5];Jonathan Solomon 等人将 CD-MA 技术应用于 CCD 几何超分辨中:在 CCD 焦平面中对不同频谱进行编码,在获得图像后进行解码,在该过程中,需要复杂的硬件来实现频谱编码^[6]。在硬件实现方法中,大多采用亚像元成像方法:获得同一目标的具有相互移位信息的多幅低分辨率图像,通过提取移位图像中的冗余信息来提高 CCD 几何分辨率。Russell C. Hardie^[7]等人通过扫描及旋转机构来获取同一地面目标的多幅图像,由于 CCD 像元尺寸很小,要达到高的移位精度是很困难的,因而必须在图像融合之前进行图像配准;王凌、刘其涛^[8-9]等人也对该方法进行了研究,其不同之处在于假设了位移的精确已知性,避免了图像配准。法国 SPOT_5 和德国宇航中心研制的 HSRS(Hot Spot Recognition Sensors)以及 Davis A. Lange 等人提出的新型 CCD 设计方案中,在焦平面上放置两片线阵方向上错开半个像元的 CCD,将微扫描转化为静态错位,避免了移位精度的难题,但在图像后续处理中,需要对图像进行插值处理^[10-13]。

本文采用两线阵 CCD 在焦平面集成的方法,两 CCD 在线阵方向上错开半个像元,同时将 CCD 读出时间减半,对所得图像数据进行交织重组,所得图像分辨率约为低分辨率图像的 2 倍,显著地减轻了由于欠采样造成的图像模糊。

2 亚像元超分辨重建数学模型

奈奎斯特定理是亚像元超分辨重建数学模型的基础。奈奎斯特定理指出:如果输入信号为频带有限信号,若其最高频率为 f_m ,当采样频率 $f_s \geq 2f_m$ 时,采样信号将能复现模拟信号的全部信息;当采样频率 $f_s \leq 2f_m$ 时,采样信号将产生频率混迭。构建亚像元重建离散数学模型如图 1 所示^[14]:

设 $O(x, y)$ 为地面目标景物,在水平方向和垂直方向分别以采样频率 $k_h h_s, k_v v_s$ 对地面目标景物采样,如果采样频率满足采样定理,则所得到的离散图像 $d(n_1, n_2)$ 可以完全描述模拟图像,该离散图像也是通过亚像元方法欲重构的高分辨率图像,其维数假定为 $k_h N_h \times k_v N_v = k_h k_v N(k_h, k_v$

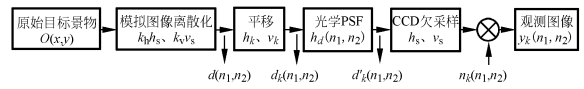


图 1 亚像元超分辨重建数学模型

Fig. 1 Mathematic model for subpixel superresolution

分别为水平方向和垂直方向上分辨率增长因子,即重构高分辨率图像与观测低分辨率图像在两个方向上的分辨率之比)。依据采样定理,有:

$$d(n_1, n_2) = d_o(n_1/k_h h_s, n_2/k_v v_s) = [O(x, y) \cdot \text{rect}(xk_h h_s) \cdot \text{rect}(yk_v v_s)] \cdot \text{comb}(xh_s/k_h) \cdot \text{comb}(yv_s/k_v). \quad (1)$$

将高分辨率图像 $d(n_1, n_2)$ 在水平方向和垂直方向分别移动 h_k, v_k , 以模拟地面目标与 CCD 器件之间的相互错位,得到平移后图像 $d_k(n_1, n_2)$ (移动距离 h_k, v_k 的单位为高分辨率图像 $d(n_1, n_2)$ 像元数), $d_k(n_1, n_2)$ 满足以下关系式:

$$d_k(n_1, n_2) = d(n_1 + h_k, n_2 + v_k). \quad (2)$$

移动后图像经光学透镜后会产生光学模糊,得到图像 $d'_k(n_1, n_2)$, 则有:

$$d'_k(n_1, n_2) = d_k(n_1, n_2) \cdot h_d(n_1, n_2), \quad (3)$$

图像 $d'_k(n_1, n_2)$ 经 CCD 欠采样及噪声叠加后,得到观测图像 $y_k(n_1, n_2)$, 该过程可以用下式描述:

$$y_k(n_1, n_2) = d'_k(k_h n_1, k_v n_2) + n_k(n_1, n_2), \quad (4)$$

式中, $k=1 \sim p$, p 为得到观测图像帧数。

以上整个过程可以用下式来表示:

$$y_k(n_1, n_2) = d(n_1 + h_k, n_2 + v_k) \cdot h_d(n_1, n_2) + n_k(n_1, n_2). \quad (5)$$

上式建立了高分辨率图像 $d(n_1, n_2)$ 与低分辨率观测图像 $y_k(n_1, n_2)$ 之间的关系。超分辨重建的目的就是根据得到的各低分辨率观测图像来重构高分辨率图像。本文研究 CCD 像元对成像质量的影响,在此,将光学系统看成理想光学系统,即不考虑 $h_d(n_1, n_2)$ 的影响。

3 亚像元成像方法

亚像元成像方法主要有两种:棱镜分光和焦平面集成方法,在此选用焦平面集成方法。在同一 CCD 器件内部,集成两片相同的线阵 CCD,像元数目为 N 、像元尺寸为 $a \times a$, 两 CCD 在线阵方

向上错开 $a/2$, 在扫描方向上错开 $n \times a$ (n 为整数), 示意图如图 2 所示。

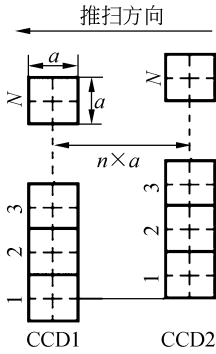


图 2 亚像元成像方法示意图

Fig. 2 Sketch map of subpixel imaging

在扫描过程中, CCD 读出时间减半, 即 CCD 扫描步进距离为 $a/2$ 。单 CCD 与亚像元成像的等效采样网格分别如图 3, 4 所示: 对于单个线阵 CCD 推扫成像, 其在线阵方向和扫描方向上的采样距离均为 a ; 对于亚像元成像, 两线阵 CCD 在线阵方向上的错位使得线阵方向上的采样距离减半, 而读出时间的减半使推扫方向上的采样距离减半。图 4 中, 黑色及水平网格区域为 CCD₁ 对应像素点, 白色及斜状网格区域为 CCD₂ 对应像素点。

如果 CCD 扫描距离为 $M \times a$, 则可以得到 $4M \times N$ 个像元灰度值, 对这些灰度值进行重组, 取出 $4(M-n) \times N$ 个进行超分辨率重建, 重组原则如下: CCD₁、CCD₂ 输出像元灰度值分别以不同矩阵表示, 分别记为 $A = [a_{i,j}]$ 、 $B = [b_{i,j}]$ ($1 \leq i \leq 2M, 1 \leq j \leq N$)。在上述矩阵中选取 $4(M-n) \times N$ 个元素, 组成 4 个矩阵, 分别记为 $C = [c_{i,j}]$ 、 $D = [d_{i,j}]$ 、 $E = [e_{i,j}]$ 、 $F = [f_{i,j}]$ ($1 \leq i \leq 2(M-n), 1 \leq j \leq N$), 方法如下:

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= a_{2i-1,j}, & d_{i,j} &= b_{2(i+n)-1,j} \\ e_{i,j} &= a_{2i,j}, & f_{i,j} &= b_{2(i+n),j} \end{aligned} \quad (6)$$

设高分辨率图像灰度值矩阵为 $H = [h_{i,j}]$ ($1 \leq i \leq 4(M-n), 1 \leq j \leq N$), 其元素值用下式表示:

$$\begin{aligned} h_{2i-1,2j-1} &= c_{i,j}, & h_{2i-1,2j} &= d_{i,j} \\ h_{2i,2j-1} &= e_{i,j}, & h_{2i,2j} &= f_{i,j} \end{aligned} \quad (7)$$

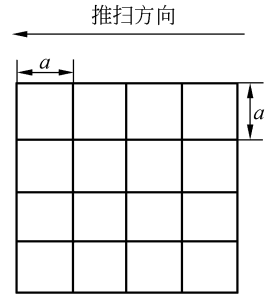


图 3 单 CCD 采样网格

Fig. 3 Single CCD sampling grid

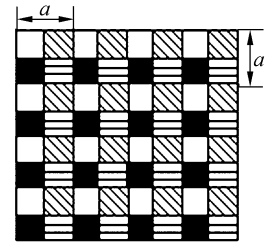


图 4 亚像元采样网格

Fig. 4 Sub-pixel sampling grid

上式中: $1 \leq i \leq 2(M-n), 1 \leq j \leq N$ 。

4 仿真实验

为验证方法的有效性, 利用 Matlab 7. 0. 1 软件进行了仿真, 仿真建立在亚像元超分辨率数学模型及上述成像方法的基础上。设定仿真实验目标是将一幅图像在水平方向和垂直方向上的分辨率各提高一倍, 即: 分辨率增长因子 $k_h = k_v = 2$ 。

仿真思想: 取一幅 256×256 的灰度图像模拟地面景物的采样图像, 采样频率满足采样定理, 该图像也是通过亚像元方法欲重构的高分辨率图像。依据 CCD 成像原理, CCD₁ 及 CCD₂ 输出图像的灰度值为高分辨率图像临近 4 个像元灰度值的均值, 该过程模拟了 CCD 1/2 欠采样。CCD 在线阵方向上的错位及读出时间减半则分别描述了高分辨率图像在水平方向和垂直方向上的平移运动。根据图 1 所示几何关系及公式 (6) 可以得到 4 个灰度矩阵, 即可以得到 4 幅低分辨率图像, $p = 4$ 。最后依据公式 (7) 合成高分辨率图像。

仿真结果如图 5、图 6 所示。



图 5 第 1 组仿真图像

Fig. 5 The first groups of simulating images

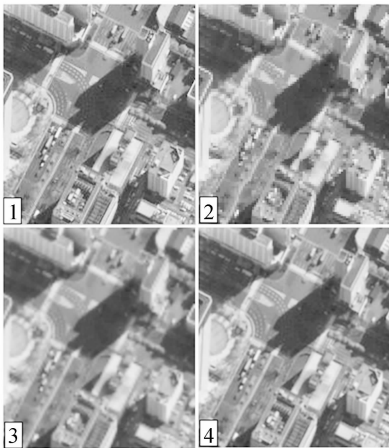


图 6 第 2 组仿真图像

Fig. 6 The second groups of simulating images

在两组仿真图像中,图像 1 为欲重构的高分辨率图像,图像 2 为其中一幅低分辨率图像,为方便比较,显示图像为原低分辨率图像在水平方向和垂直方向分别放大一倍后的图像。依据成像过程可知,其分辨率为图像 1 的 1/2。对图像 2 进行双线性插值,得到图像 3。图像 4 则是由本文给出方法所合成的高分辨率图像。所有显示图像均是截取的部分仿真图像。

从第一组仿真图像中的图像 2 可以看出,欠采样引起了图像模糊;图像 1 中人物条纹头巾上的黑白条纹清晰可见,而在图像 2 中无法识别。插值图像 3 质量稍微有些好转,但插值过程对图像进行了平滑处理,不能恢复图像中的高频细节

信息,模糊现象依然严重。在图像 4 中,可以分辨出人物头巾上的黑白条纹,但与图像 1 相比,还有差别。观察第二组仿真图像,效果与第一组图像类似,说明该方法可以有效减小欠采样引起的频率混迭,但不能完全消除。

峰值信噪比是一种比较接近人眼视觉效果的客观评价,计算公式为:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [O(i, j) - O'(i, j)]^2}, \quad (8)$$

其中: $O(i, j)$ 、 $O'(i, j)$ 分别为原始图像及重建图像中第 (i, j) 个像素灰度值。

在此,选用峰值信噪比对两组双线性插值图像及亚像元合成图像进行定量分析,结果如表 1 所示。

表 1 峰值信噪比对比

Tab. 1 Contrast of PSNR

PSNR (dB)	双线性插值图像	亚像元合成图像	亚像元合成方法提高量
第一组	21.853 8	23.340 2	1.486 4
第二组	22.931 9	25.138 9	2.207 0

从上述结果中可以看出,两组仿真图像中,亚像元合成图像的 PSNR 比双线性插值图像均有很大提高。

为验证该方法的实时性,在仿真实验中对两种方法耗用时间进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 用时对比

Tab. 2 Contrast of elapsed time

时间(ms)	双线性插值方法	亚像元合成方法	用时减少量
	10.7	3.8	6.9

5 结 论

CCD 传感器的物理结构决定了其像元成像分辨率受像元尺寸限制。本文提出了在 CCD 器件内部集成两片 CCD,两片 CCD 在线阵方向上差开半个像元,并将 CCD 读出时间减半,最终交织重组图像数据的亚像元成像方法。CCD 在线

阵方向上的错位及读出时间减半的等效结果使两个方向上采样频率提高为原来的 2 倍,理论分辨率能达到原来的 2 倍,但 CCD 采集数据有重叠区域,因而合成图像实际分辨率低于低分辨率图像的 2 倍。实验结果显示:该方法可以有效减小 CCD 有限尺寸带来的混迭现象,且两组仿真图像中 PSNR 比双线性插值图像分别高出 1.486 4 dB、2.207 0 dB,仿真用时约为双线性插值方法的 1/3。

该方法利用读出时间减半来提高扫描方向上的采样频率,这对于光照强度不高的目标景物来说是不利的。但该方法对于光照强度足够的目标景物,可以实时合成出高分辨率图像。为进一步提高合成图像分辨率,在不要求实时性的条件下,可以依据亚像素成像数学模型来建立高分辨图像与低分辨率图像之间的关系,利用梯度下降或共轭梯度算法最优化求解,以合成高分辨率图像。

参考文献:

- [1] 楚恒,朱维乐. 基于 DCT 变换的图像融合方法研究[J]. 光学精密工程,2006,14(2): 266-273.
CHU H, ZHU W L. Image fusion algorithms using discrete cosine transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 266-273. (in Chinese)
- [2] 黄勇,陈琳. 一种基于 SOFM 聚类的星图识别算法[J]. 光学精密工程,2004,12(6): 346-351.
HUANG Y, CHEN L. Star pattern recognition algorithm based SOFM clustering function[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6):346-351. (in Chinese)
- [3] 潘梅森,荣秋生. 基于 SOFM 神经网络的图像融合二值化方法[J]. 光学精密工程,2007,15(3): 401-406.
PAN M S, HE Q SH. Image fusion binarization method based on SOFM neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):401-406. (in Chinese)
- [4] 何永义,夏俊昇. 工程图像的矢量化技术[J]. 光学精密工程,2002,10(8):374-378.
HE Y Y, XIA J SH. Vectorization technology for engineering image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(8):374-378. (in Chinese)
- [5] VITALLI R, BELLO U D, ARMBRUSTER P. Aliasing effects mitigation by optimized sampling grids and impact on image acquisition chains [J]. *IEEE*, 2002:979-981.
- [6] SOLOMON J, ZALEVSKY Z, MENDLOVIC D. Geometric superresolution by code division multiplexing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1):32-40.
- [7] HARDIE R C, BARNARD K J, BOGNAR J G, *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.
- [8] 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.
WANG L, ZHANG P, FENG H J, *et al.*. An inversion analysis method based on multi-shift imaging for improvement of CCD imaging resolution [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(3): 62-65. (in Chinese)
- [9] 刘其涛,李金萍,张峻. 用像元重叠采样提高 CCD 成像分辨率的方法[J]. 激光与红外,2005,35(3):210-213.
LIU Q T, LI J P, ZHANG J. Study on improving spatial resolution of images with CCD in overlap sampling [J]. *LASER & INFRARED*, 2005, 35(3): 210-213. (in Chinese)
- [10] LATRY C, ROUGE B. SPOT5 THR MODE [J]. *SPIE*, 1998, 3439:480-491.
- [11] SKRBK W, LORENZ E. HSRS-An Infrared Sensor for Hot-Spot-Detection [J]. *SPIE*, 1998, 3437:167-175.
- [12] LANGE D A, VU P, WANG S C. 6000 Element Infrared Focal Plane Array for Reconnaissance Applications [J]. *SPIE*, 1999, 3751:145-158.

- [13] 周峰,王世涛,王怀义. 关于亚像元成像技术几个问题的探讨[J]. 航天返回与遥感,2002,23(3):26-33.
ZHOU F, WANG SH T, WANG H Y. Study of several points about subpixel imaging technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002,23(3):26-33. (in Chinese)
- [14] H. CHA J, JACOBS E. Superresolution reconstruction and its impact on sensor performance [J]. *SPIE*, 2005, 5784:107-113.

作者简介:徐正平(1983—),男,河南许昌人,博士研究生,主要从事 CCD 几何超分辨成像方法研究及精密仪器的开发。

E-mail: xuzp090@163.com

导师简介:翟林培(1945—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事航空相机的研制工作。

● 下期预告

功能梯度压电驱动器的结构设计、制备与功能验证

裘进浩,姜皓,季宏丽,朱孔军,李勇君

(南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

针对作者在以前的研究中提出的一种新型的功能梯度驱动器,本文设计并制备了该驱动器,建立了理论模型,并对驱动器的性能进行了测试。这种新型功能梯度驱动器由 4 种基于 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ 系列的材料复合而成,且四层材料的压电常数和介电常数在厚度方向上的梯度变化相反,这种梯度结构能使驱动器结构内部的应力分布优于传统弯曲驱动器。为了对驱动器进行优化设计,利用经典复合材料力学和压电方程建立了功能梯度压电驱动器的理论模型,并计算了不同厚度配比的驱动器受电压和自由端集中力单独作用时的准静态变形和应力分布,通过分析驱动器的内部应力,确定了各层最优厚度配比为 1:1:1:1。根据优化结果成功制备了功能梯度压电驱动器,并测量了驱动器自由端输出位移与输出力的关系,测量结果表明:功能梯度压电弯曲驱动器的输出位移和输出力呈线性关系,并且频率越低,输出位移和力就越大。