

·信号与信息处理·

## 一种亚像素级图像超分辨恢复算法

赵秀影<sup>1,2</sup>, 胡玉臣<sup>2</sup>, 翟林培<sup>1</sup>, 葛文奇<sup>1</sup>, 徐正平<sup>1</sup>, 王敬梅<sup>3</sup>

(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. 空军航空大学, 吉林 长春 130022; 3. 青岛城市建设投资集团有限责任公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:**随着光学成像到光电数字成像的转变,如何提高 CCD 的几何分辨率,已成为研制高分辨光电成像系统亟待解决的问题.建立了半像素超分辨成像数学模型,提出了半像素的 CCD 几何超分辨方法.该方法将 2 片线阵 CCD 集成在同一器件中,在线阵方向上错开半个像素,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 软件对双线性插值方法及半像素成像方法进行了仿真,并定性定量地分析了 2 种方法的效果.结果显示:半像素方法合成图像分辨率约为低分辨率图像的 2 倍,且 2 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:**半像素;超分辨;CCD

**中图分类号:**TP751.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-1255(2009)05-0054-03

## A kind of Image Super-Resolution Restoration Algorithm Based on Sub-Pixel

ZHAO Xiu-ying<sup>1, 2</sup>, HU Yu-chen<sup>2</sup>, ZHAI Lin-pei<sup>1</sup>, GE Wen-qi<sup>1</sup>, XU Zheng-ping<sup>1</sup>, WANG Jing-mei<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Optical fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;  
2. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;  
3. Qingdao Urban Construction Investment Group Co., Ltd., Shandong 266071, China.)

**Abstract:** With the changes from optical imaging to digital imaging, how to improve the geometric resolution of CCD has become a problem urgent to be solved in developing a high-resolution electrical imaging system. A mathematic model for imaging on super-resolution and sub-pixel was built, a method to improve the geometric resolution of CCD based on sub-pixel was presented, in which two linear CCDs staggered by half dimension of the pixel in the line direction are integrated in one component, while 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, were simulated with the software MATLAB. The effects of the two methods were analyzed qualitatively and quantitatively. The 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 to 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:** sub-pixel; super-resolution; charge coupled device(CCD)

遥感相机是获取地面信息的重要手段,相机作为遥感器的主要载荷形式之一,被世界各国广

收稿日期:2009-08-17

基金项目:国家 863 计划(2007AA701203)

作者简介:赵秀影(1972-),女,辽宁昌图人,博士,讲师,主要从事机械电子与信息处理研究.

泛用于资源普查、地形测绘、军事侦察等许多领域。相机按成像介质可分为胶片型和 CCD 传输型 2 类。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 2 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。从 CCD 传输型相机入手,对其所成图像进行超分辨显示研究。CCD 分为线阵列和面阵列 CCD,应实际需求,文中只研究线阵列 CCD。

CCD 相机在获取图像的过程中受其固有的传感器阵列像元几何尺寸的限制,图像的空间分辨率不可能很高。如果采用减小像元几何尺寸的办法来提高图像分辨率和消除变形效应,则因技术难度大、费用昂贵而很难实现。CCD 图像几何超分辨方法主要有 2 种:软件插值及亚像元成像方法。软件插值只是利用低分辨率图像原始信息,而并未获得新的图像信息,因此,分辨率很难提高;亚像元成像方法的核心思想是获得同一目标的多幅低分辨率图像,各图像之间存在移位信息,通过软件提取移位图像中的冗余信息,以达到提高 CCD 几何分辨力的目的。

### 1 半像元错位图像成像技术方法

半像元错位图像,就是使获得的 2 帧图像之间在垂直和平行传感器飞行方向均相差半个像元。目前有 2 种技术措施可以达到图像半像元错位的效果,一种是有直接采用半像元错开排列的 CCD 器件成像,另一种是采用光锥耦合技术使 2 条分置的 CCD 器件产生半像元错开效果。在此选用前一种方法。在同一 CCD 器件内部,集成 2 片相同的线阵 CCD,像元数目为  $N$ 、像元尺寸为  $a \times a$ ,2 片 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 1 所示。

在扫描过程中,CCD 读出时间减半,即 CCD 扫描步进距离为  $a/2$ 。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  $a$ ;对于半像元成像,2 片线阵 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

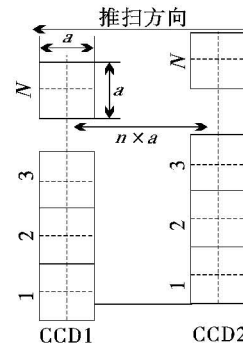


图 1 半像元成像方法示意图

半使推扫方向上的采样距离减半。

尽管半像元错位图像的 2 种成像方式存在着一定的差异,但从 CCD 成像的物理原理可知,CCD 像元的灰度值是该像元内光能量的平均值,因此对低分辨率图像而言,每一个像元都是高分辨率图像的 4 个相邻像元的灰度均值,故 2 种方式获得的低分辨率图像和高分辨率图像都存在着如图 2 所示的关系。

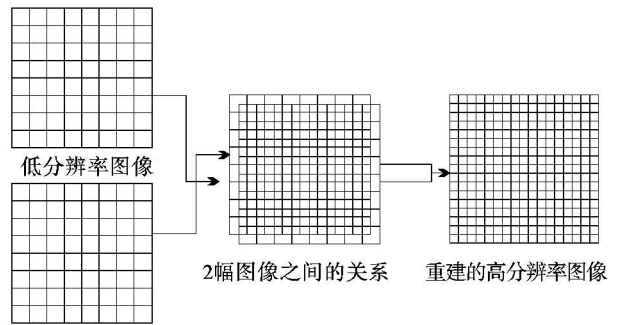


图 2 低分辨率图像融合过程

### 2 迭代分解像元法

在图 3 中设 CCD 像面上原图像分辨率为  $2N$ 。

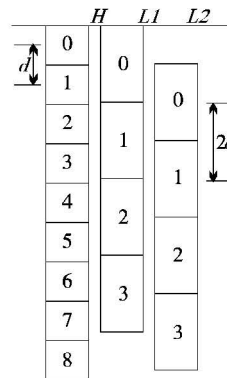


图 3 低分辨率图像与高分辨率图像的位置关系示意图

当采用分辨率为  $2N$  的 CCD 传感器  $H$  时, 每个 CCD 单元的间隔为  $d$ , 获取图像的分辨率为  $2N$ . 当采用分辨率为  $N$  的 CCD 传感器  $L1$  时, 每个 CCD 单元的间隔为  $2d$ , 获取图像的分辨率为  $N$ . 把 CCD 传感器  $L1$  在垂直方向上错开距离  $d$  (即低分辨率半个像元的大小) 放置在  $L2$  的位置, 那么同样可以获取分辨率为  $N$  的图像, 由于错开距离  $d$  的原因,  $L2$  获取的图像与  $L1$  获取的图像并不完全相同.

因为 CCD 像元的灰度值是该像元内光能量的平均值, 则由 2 个小像元组成的大像元的灰度值就是 2 个小像元灰度值的平均值. 因此可以认为  $L1$  和  $L2$  中每一个像元的灰度值都是  $H$  中对应的 2 个相邻像元的灰度值的平均值. 即

$$\begin{aligned} L1_n &= \frac{H_{2n} + H_{2n+1}}{2} \\ L2_n &= \frac{H_{2n+1} + H_{2n+2}}{2} \\ L1_{n+1} &= \frac{H_{2n+2} + H_{2n+3}}{2} \\ L2_{n+1} &= \frac{H_{2n+3} + H_{2n+4}}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

从式(1)中可以求出

$$\begin{aligned} H_{2n+1} &= 2L1_n - H_{2n} \\ H_{2n+2} &= 2L2_n - H_{2n+1} \\ H_{2n+3} &= 2L1_{n+1} - H_{2n+2} \\ H_{2n+4} &= 2L2_{n+1} - H_{2n+3} \end{aligned} \quad (2)$$

只要已知  $H_0$ , 根据式(2)可以依次求出  $H_1, H_2, \dots, H_{2n+1}$ .  $H_0$  的初值可以取  $L1_0$ , 即  $H_0 = L1_0$ . 式(2)针对的图像只是在垂直方向有错位发生, 当 2 幅低分辨率图像之间在垂直和水平方向均有错位时, 只须按照式(2)对 2 个方向的像元同时进行重建操作即可达到重建的目的.

### 3 仿真实验

为验证文中提出方法的有效性, 利用 MATLAB7.0.1 软件进行了仿真. 仿真是建立在半像元超分辨率数学模型及上述成像方法的基础上.

仿真实验的最终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  $k_h = k_v = 2$ . 其仿真思想为: 取一幅  $256 \times 256$  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, 该图像也是通过半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 所示几何关系及式(1)可以得到 4 个灰度矩阵, 即得到 4 幅低分辨率图像,  $p=4$ . 最后依据式(2)合成高分辨率图像.

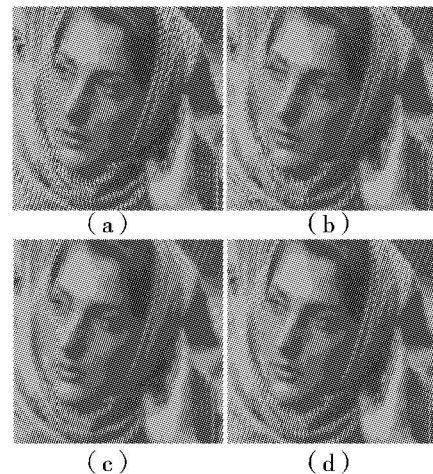


图 4 仿真图像

仿真结果如图 4 所示. 图 4a 为欲重构的高分辨率图像, 图 4b 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 4a 的 1/2. 从图像 4b 可以看出, 欠采样引起了图像模糊: 图 4a 中人物条纹头巾上的黑白条纹清晰可见, 而在图 4b 中无法识别. 对图 4b 进行双线性插值, 得到图 4c. 插值后图像质量稍微有些好转, 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. 利用文中给出方法合成的图像如图 4d 所示, 可以分辨出人物头巾上的黑白条纹, 但与图 4a 相比, 还有差别, 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, 在此, 选用峰值信噪比对双线性插值图像及半像元合成图像进行定量分析, 结果如表 1.

表 1 峰值信噪比对比

评价标准	双线性插值图像	半像元合成图像
PSNR/dB	23.561	23.766

(下转第 80 页)

疲劳损伤为

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \left( \frac{n_3}{N_3} \right) = \left( \frac{1.6}{3.49} \right) = 0.458 \leq 1$$

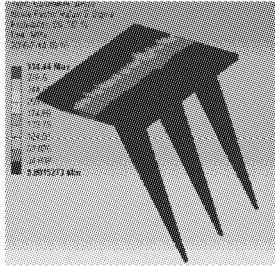


图 7 Z 方向最大应力

可以满足随机振动的相关要求。

### 3 结 束 语

通过使用软件仿真工具与随机振动疲劳理论计

算相结合的方法,可以比较准确地对设备随机振动进行仿真分析,并得出相应的结论.这样就能给设计者在设计前期提供充分的设计依据.另外,实例中的设备已通过试验验证,可以确定本仿真分析方法可行.

#### 参考文献

- [1] 纽兰(英).随机振动与谱分析[M].北京:机械工业出版社,1980.
- [2] 孙志礼,何雪宏,何韶君.机械设计[M].北京:冶金工业出版社,1998:9-19.
- [3] 李超.基于功率谱密度的疲劳寿命估算[J].机械设计与研究,2005(4):6-9.
- [4] 周敏亮,陈忠明.飞机结构随机振动疲劳分析方法[J].飞机设计,2008(4):46-49.
- [5] 王长武,张幼安.随机疲劳分析在设备疲劳寿命中预测的应用[J].机械工程,2004,21(11月上):1906-1908.
- [6] 郭强岭,陈建明.喷气式飞机外挂可靠性试验振动条件探讨[J].航空兵器,2004(4):39-43.

(上接第 56 页)

从上述结果中可以看出,半像元合成图像的 PSNR 比双线性插值图像高出 0.2 dB.

峰值信噪比计算公式为

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

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

### 4 结 束 语

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.文中提出了在 CCD 器件内部集成 2 片 CCD,2 片 CCD 在线阵方向上错开半个像元,并减小 CCD 读出时间的半像元成像方法.CCD 在线阵方向上的错位及读出时间减半的等效结果是 2 个方向上采样间隔减小为原来的 1/2,即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 PSNR 比双线性插值图像高 0.2 dB.

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,可以依据半像元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] 徐正平,翟林培,葛文奇,等.亚像元的 CCD 几何超分辨率方法[J].光学精密工程,2008,16(12):2447-2453.
- [2] Jae H Cha, Eddie Jacobs. Superresolution reconstruction and its impact on sensor performance [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5784:107-113.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王凌,张平,冯华君,等.用多次移位成像提高 CCD 成像分辨率的反演解析法[J].光电工程,2003,30(3):62-65.
- [8] 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.
- [9] 胡燕,胡莘,王昱.半像元错位图像的超分辨率重建方法[J].测绘科学与工程,2004,24(1):24-29.