

## 面阵电荷耦合器件错位成像的建模与仿真

李亚鹏<sup>1,2</sup>, 何斌<sup>1</sup>, 王文华<sup>1</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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了定量研究面阵电荷耦合器件(CCD)错位成像技术图像质量的提高以及 CCD 像元填充因子对图像质量的影响,建立了仿真不同像元填充因子的面阵 CCD 错位成像的数学模型。以 Matlab 为平台,不考虑噪声的干扰,对 ISO12233 标准分辨率测试卡子图像进行了仿真,结果表明,CCD 像元填充因子为 100%时,与普通成像模式相比,对角错位、四点错位成像模式图像的灰度平均梯度分别提高了 2.9970、3.4136,拉普拉斯能量分别提高了 0.5676、0.7478,且 CCD 像元填充因子为其他值时,相较于普通成像模式,对角错位、四点错位成像模式图像的 GMG 和 EOL 均得到提高;采用四点错位成像模式时,与填充因子为 100%的面阵 CCD 相比,填充因子为 69%、44%、25%的面阵 CCD 四点错位成像模式图像的灰度平均梯度分别提高了 1.433 0、3.337 3、5.153 2,拉普拉斯能量分别提高了 0.638 0、1.704 4、3.196 8,且采用其他成像模式时,填充因子为 100%、69%、44%、25%的图像的 GMG 和 EOL 均不断提高。研究表明,面阵 CCD 错位成像技术能够提高图像质量,且四点错位成像模式图像质量优于对角错位成像模式;在满足信噪比指标要求的前提下,对于面阵 CCD 同一成像模式,像元填充因子越小,图像质量越高。

**关键词:** 面阵电荷耦合器件错位成像; 仿真模型; 填充因子; 灰度平均梯度; 拉普拉斯能量  
**中图分类号:** TN386.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2767-07

## Modeling and simulation of subpixel imaging for area charge coupled device

Li Yapeng<sup>1,2</sup>, He Bin<sup>1</sup>, Wang Wenhua<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to quantitatively investigate image quality improvement of area CCD subpixel imaging and influence of fill factor on image quality, a mathematical model was established to simulate subpixel imaging of array CCD with different fill factors. Without consideration of noise influence, simulation experiment for a sub-image of ISO12233 standard resolution card was performed on Matlab. Experiment results illustrate that, when fill factor is 100%, compared with common imaging mode of array CCD, gray mean gradient (GMG) of diagonal subpixel and four-point subpixel imaging mode was increased by 2.997 0, 3.413 6 respectively, and energy of Laplacian (EOL) is enhanced by 0.567 6, 0.747 8 respectively.

收稿日期:2015-01-05; 修订日期:2015-02-03

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(863-2-5-1-13B)

作者简介:李亚鹏(1987-),男,博士生,主要从事光电成像技术方面的研究。Email:liy1123@163.com

导师简介:何斌(1961-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事空间遥感图像处理方面的研究。Email:hemail@163.com

With the same fill factor other than 100%, GMGs and EOLs of common imaging mode, diagonal subpixel imaging mode, and four-point subpixel mode are increasing in that order too. For four-point subpixel imaging mode, GMG of 69%, 44%, 25% fill factor is improved by 1.433 0, 3.337 3, 5.153 2 respectively compared with that of 100% fill factor, and EOL increased by 0.638 0, 1.704 4, 3.196 8 respectively. With the same imaging mode other than four-point subpixel, GMGs and EOLs of images obtained with CCDs whose fill factor is 100%, 69%, 44%, 25% increase too. Research shows that subpixel technique of array CCD can improve image quality, and four-point subpixel imaging mode provides more improvement on image quality than diagonal subpixel imaging mode. In the condition of signal-to-noise ratio is met, the image quality performance becomes better when fill factor decrease for the same CCD imaging mode.

**Key words:** subpixel imaging of area CCD; simulation model; fill factor; gray mean gradient; energy of Laplacian

## 0 引言

电荷耦合器件(CCD)是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种光电成像器件,随着 CCD 器件制造及其应用技术日趋成熟,已被广泛应用于航天航空遥感成像、工业检测等领域。采用传统的方法提高 CCD 相机的分辨率,增大光学系统焦距、减小 CCD 像元尺寸,会造成相机体积、质量、成本增加等问题。随着人们对分辨率的要求越来越高,如何在现有的成像系统基础上提高分辨率,成为研究热点<sup>[1-2]</sup>。

近年来,CCD 错位成像技术备受国内外关注,CCD 错位成像技术能够在不改变光学系统焦距和 CCD 像元尺寸的前提下,提高图像分辨率、增强图像质量。法国 2002 年发射的 SPOT5 卫星、德国 BIRD 卫星上红外遥感器 HSRS、莱卡公司数字航空遥感相机 ADS40 以及美国前视红外系统公司(FLIR)的 AN/AAQ-22 Star SAFIRE 和 BRITE Star 系列相机都使用了类似的技术<sup>[3-5]</sup>,提高了 CCD 相机的分辨率。另外,法国 Thales 公司、英国 BAE Systems、德国 Jenoptik 公司、德国 InfraTec 公司、加拿大、丹麦、韩国等都有应用 CCD 错位成像技术提高分辨率的报道<sup>[6-7]</sup>。国内也有诸多研究成果<sup>[6-9]</sup>。像元的填充因子是 CCD 的一项重要指标,对图像质量会产生影响,由于通过实验验证 CCD 错位成像技术周期长、成本高,在 CCD 错位成像技术工程应用之前,理论上研究 CCD 错位成像技术图像质量的提高以及 CCD 像元填充因子对图像质量的影响,对工程应用具有一定的指导意义。

基于此,文中建立了仿真面阵 CCD 错位成像的数学模型,可用于模拟仿真不同填充因子的面阵 CCD 的不同错位成像模式的成像结果。介绍了面阵 CCD 错位成像技术以及两种常用的错位成像模式,对角错位和四点错位。利用 Matlab 平台对 ISO12233 标准测试卡子图像进行了仿真实验,并采用无参考评价参数从客观上评估了不同填充因子的面阵 CCD 的普通成像模式、对角错位成像模式和四点错位成像模式的图像质量。

## 1 面阵 CCD 错位成像技术

面阵 CCD 阵列是由单个 CCD 像元排列而成的,其示意图如图 1 所示,图 1 中面阵 CCD 为  $2 \times 2$  阵列,像元大小为  $p \times p$ ,像元感光区域大小为  $d \times d$ ,相邻 CCD 像元的间距为  $p$ ,这里考虑常见的方型像元。CCD 像元填充因子(fill factor)的定义如公式(1)描述,即像元感光区域面积占整个像元面积的比例<sup>[10]</sup>。

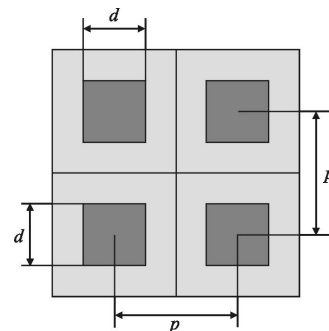


图 1 面阵 CCD 示意图

Fig.1 Sketch map of area CCD

$$\text{Fill factor} = \frac{d \times d}{p \times p} \times 100\% \quad (1)$$

面阵 CCD 错位成像技术,是通过使用一定的方法使同一个 CCD 按照一定的移位方式对同一场景成像,移位距离小于 CCD 像元尺寸,每移位一次,就成像一次,然后对得到的多幅图像按照相互之间的移位关系进行融合、重建,最终得到高分辨率图像。常用的面阵 CCD 错位成像模式有两种,对角错位成像和四点错位成像,如图 2 所示,其移位步长均为半个 CCD 像元尺寸的距离,即  $p/2$ 。

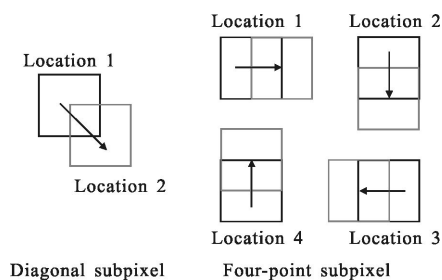


图 2 面阵 CCD 对角错位和四点错位成像模式

Fig.2 Diagonal and four-point subpixel imaging of area CCD

为更直观地表达面阵 CCD 错位成像模式,采用采样网格来表示错位成像模式与传统成像模式的不同。假设面阵 CCD 为  $3 \times 3$  阵列,面阵 CCD 普通成像模式的采样网格如图 3 所示, $p$  表示面阵 CCD 采样间隔。

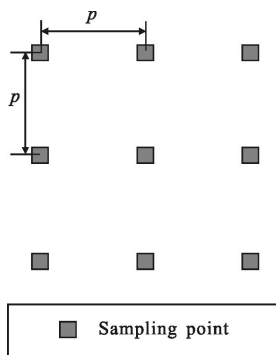


图 3 面阵 CCD 普通成像模式采样网格

Fig.3 Sampling grid of common imaging mode of area CCD

面阵 CCD 对角错位成像模式,如图 2 所示,面阵 CCD 在位置 1 处成像,得到第 1 幅图像,然后,面阵 CCD 向右移动半个像元的距离,再向下移动半个像元的距离,到达位置 2 处成像,得到第 2 幅图像。其采样网格如图 4 所示,对得到的 2 幅低分辨率图

像进行融合、插值等处理,最终得到分辨率得到提高的图像。

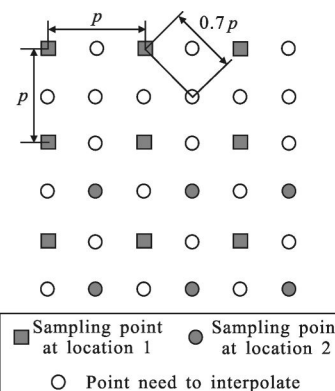


图 4 面阵 CCD 对角错位模式采样网格

Fig.4 Sampling grid of diagonal subpixel imaging mode of area CCD

面阵 CCD 四点错位成像模式,如图 2 所示,面阵 CCD 按照图示移位方式移位,移位步长为半个 CCD 像元的距离,在位置 1、2、3、4 处分别成像,对得到的 4 幅低分辨率图像按照相互移位关系进行交织重组,最终获得高分辨率图像。其采样网格如图 5 所示。

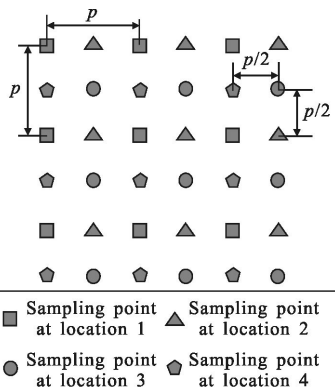


图 5 面阵 CCD 四点错位模式采样网格

Fig.5 Sampling grid of four-point subpixel imaging mode of area CCD

由上分析,面阵 CCD 错位成像实际上都是增加了采样点的个数、减小了采样间隔,从而提高了采样频率,由奈奎斯特定理,尽管采样有重叠区域,也能一定程度上降低混叠和伪相应,提高图像质量。

## 2 仿真模型

依据 CCD 成像原理,CCD 阵列像元的输出与景物像素灰度值成正比。采用现有的高分辨率图像来模拟景物,对“景物”降采样来模拟光学成像系统的输出,即成像图像。降采样就是将原始高分辨率图像相邻的一组像素灰度值取平均,来模拟成像图像

的一个像素灰度值。对“景物”进行有相互错位的降采样,即可模拟面阵 CCD 错位成像,然后,对降采样得到的多幅图像进行重建处理,最终得到面阵 CCD 不同成像模式的成像结果。

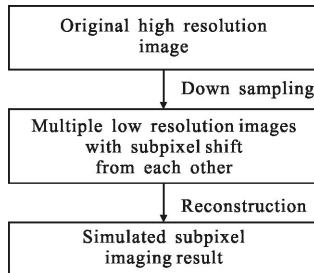


图 6 仿真面阵 CCD 错位成像的框图

Fig.6 Block diagram of simulation of subpixel imaging of area CCD

仿真面阵 CCD 错位成像的过程如图 6 所示,原始高分辨率图像用来模拟景物,降采样过程用来模拟面阵 CCD 错位成像系统,最终图像用来模拟面阵 CCD 错位成像的最终成像结果。

CCD 像元尺寸及其感光区域的关系如图 1 所示,文中采用原始高分辨率图像  $p \times p$  个像素来模拟一个 CCD 像元对应的景物,采用这  $p \times p$  像素中心位置的  $d \times d$  个像素的平均值作为 CCD 像元的输出,水平及垂直方向采样间隔均为  $p$  个像素,这就模拟了 CCD 像元尺寸为  $p \times p$ 、感光区域为  $d \times d$  的 CCD 成像过程。当  $p$  不变,取不同的  $d$ ,即可模拟具有不同填充因子的 CCD 成像。对原始高分辨率图像进行错位  $p/2$  个像素的降采样,即模拟了具有相互错位关系的多幅低分辨率图像,对多幅低分辨率图像进行重建处理,即可模拟最终 CCD 错位成像的成像图像。

### 2.1 对角错位模式仿真

原始高分辨率图像  $f(i, j)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ , 即原始高分辨率图像大小为  $m \times n$ 。仿真面阵 CCD 对角错位模式的步骤为:

(1) 补充  $f(i, j)$  的行和列, 补充  $p/2$  行、 $p/2$  列。

(2) 对  $f(i, j)$  按照图 2 对角错位模式的错位关系降采样得到 2 幅低分辨率图像。

$$\begin{aligned}
 lr_1(i, j) &= \frac{1}{d \times d} \sum_{x=p \times i+a}^{p \times i+b} \sum_{y=p \times j+a}^{p \times j+b} f(x, y) \\
 lr_2(i, j) &= \frac{1}{d \times d} \sum_{x=p \times i+a+c}^{p \times i+b+c} \sum_{y=p \times j+a+c}^{p \times j+b+c} f(x, y) \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中:  $a=-p+1+\frac{p-d}{2}$ ,  $b=-\frac{p-d}{2}$ ,  $c=-\frac{p}{2}$ 。  $i=1, 2, \dots,$

$m, j=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 对步骤(2)得到的 2 幅具有相互移位的低分辨率图像  $lr_1(i, j), lr_2(i, j)$  进行融合、插值处理, 重建得到对角错位成像模式的成像结果图像  $g_{\text{Diagonal}}(i, j)$ , 其大小为  $2m/p \times 2n/p$ 。

$$\begin{aligned}
 g_{\text{Diagonal}}(2i-1, 2j-1) &= lr_1(i, j) \\
 g_{\text{Diagonal}}(2i, 2j) &= lr_2(i, j) \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m/p, j=1, 2, \dots, n/p$ 。而  $g_{\text{Diagonal}}(2i, 2j-1)$  和  $g_{\text{Diagonal}}(2i-1, 2j)$  的灰度值需要插值。常用的插值方法有四点插值、中值插值、B 样条插值等, 文中采用 B 样条插值方法。

### 2.2 四点错位模式仿真

原始高分辨率图像  $f(i, j)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ , 即原始高分辨率图像大小为  $m \times n$ 。仿真面阵 CCD 四点错位模式的步骤为:

(1) 补充  $f(i, j)$  的行和列, 补充  $p/2$  行、 $p/2$  列。

(2) 对  $f(i, j)$  按照图 2 四点错位模式的错位关系降采样得到 4 幅低分辨率图像。

$$\begin{aligned}
 lr_1(i, j) &= \frac{1}{d \times d} \sum_{x=p \times i+a}^{p \times i+b} \sum_{y=p \times j+a}^{p \times j+b} f(x, y) \\
 lr_2(i, j) &= \frac{1}{d \times d} \sum_{x=p \times i+a}^{p \times i+b} \sum_{y=p \times j+a+c}^{p \times j+b+c} f(x, y) \\
 lr_3(i, j) &= \frac{1}{d \times d} \sum_{x=p \times i+a+c}^{p \times i+b+c} \sum_{y=p \times j+a+c}^{p \times j+b+c} f(x, y) \\
 lr_4(i, j) &= \frac{1}{d \times d} \sum_{x=p \times i+a+c}^{p \times i+b+c} \sum_{y=p \times j+a}^{p \times j+b} f(x, y) \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中:  $a=-p+1+\frac{p-d}{2}$ ,  $b=-\frac{p-d}{2}$ ,  $c=\frac{p}{2}$ 。  $i=1, 2, \dots, m/p, j=1, 2, \dots, n/p$ 。

(3) 对步骤(2)得到的 4 幅具有相互移位的低分辨率图像  $lr_1(i, j), lr_2(i, j), lr_3(i, j), lr_4(i, j)$  按照相互移位关系交织重组, 重建得到四点错位成像模式的成像结果图像  $g_{\text{Four-point}}(i, j)$ , 其大小为  $2m/p \times 2n/p$ 。

$$\begin{aligned}
 g_{\text{Four-point}}(2i-1, 2j-1) &= lr_1(i, j) \\
 g_{\text{Four-point}}(2i-1, 2j) &= lr_2(i, j) \\
 g_{\text{Four-point}}(2i, 2j) &= lr_3(i, j) \\
 g_{\text{Four-point}}(2i, 2j-1) &= lr_4(i, j) \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中:  $i=1, 2, \dots, m/p, j=1, 2, \dots, n/p$ 。

## 3 仿真结果与分析

在 Matlab 平台上, 采用 ISO12233 标准分辨率测试卡子图像进行仿真实验, 分别模拟仿真不同填充

因子的面阵 CCD 普通模式成像、对角错位模式成像和四点错位模式成像。

如图 7(a)所示,截取 ISO12233 标准分辨率测试卡作为原始高分辨率图像,即景物,其像素分辨率为 1 536×1 536,无噪声干扰,有着很高的信噪比。用现有图像来模拟光学成像系统的输出,要求输入图像的分辨率至少是光学成像系统输出图像分辨率的 4 倍<sup>[11]</sup>,文中取  $p=12$ , $d$  取不同值,即可模拟不同填充因子的 CCD 成像。

取  $d=12$ ,即填充因子为 100%。以图 7(a)相邻的 12×12 个像素灰度值的平均值为面阵 CCD 普通成像模式的一个像素灰度值,两个方向的采样间隔均为 12 个像素,结果为图 7(b),即面阵 CCD 普通成像模式成像结果,其像素分辨率为 128×128。按照文中建立的仿真面阵 CCD 对角错位、四点错位成像模式的模型,可分别得到面阵 CCD 对角错位和四点错位成像模式的成像结果,分别如图 7(c)、(d)所示,其像素分辨率均为 256×256。其中,对角错位模式重建过程中插值采用 B 样条插值方法。为方便比较,图 7(b)用双线性插值放大到 256×256 显示。

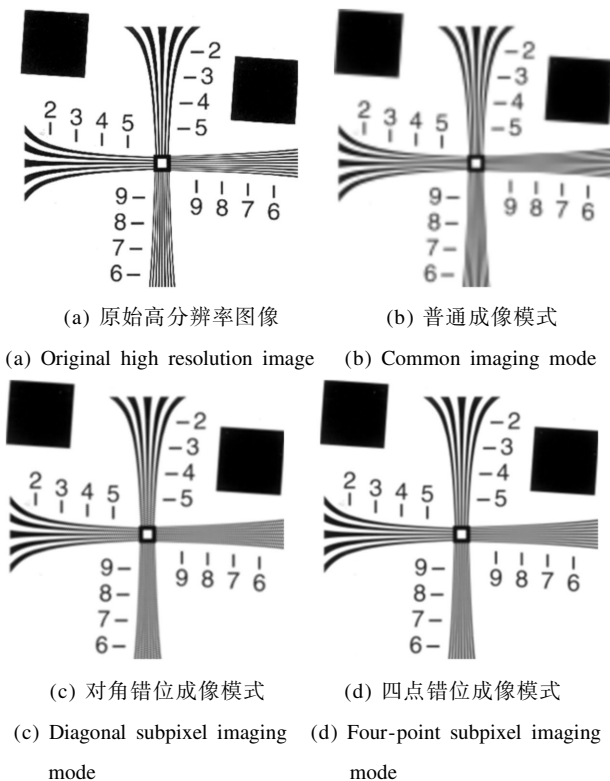


图 7 填充因子为 100%时,面阵 CCD 不同成像模式仿真结果  
Fig.7 Simulation images of different imaging mode when fill factor is 100%

$p=12$  固定不变,当  $d$  分别取 10、8、6 时,即可分别仿真填充因子为 69%、44%、25%的面阵 CCD 的各种成像模式结果。为方便比较不同填充因子对 CCD 成像结果的影响,图 8 给出了填充因子分别为 100%、69%、44%、25%的面阵 CCD 四点错位成像模式的结果。

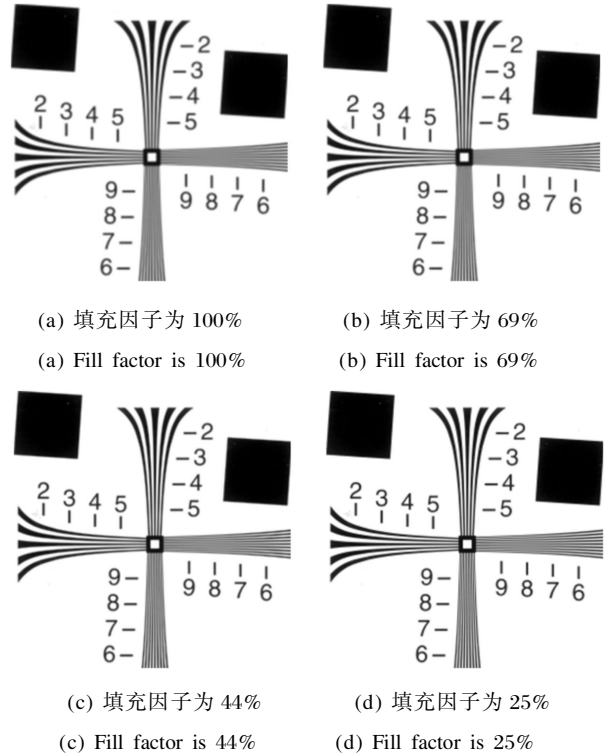


图 8 不同填充因子时,四点错位模式仿真结果  
Fig.8 Simulation of four-point subpixel imaging for different fill factor

从主观视觉角度,由图 7 仿真结果,相比于面阵 CCD 普通模式成像,面阵 CCD 错位成像模式的图像质量均有所提高,且四点错位成像模式的图像质量要优于对角错位模式成像的图像质量。由图 8 仿真结果,对于面阵 CCD 的同一成像模式,随着填充因子的降低,图像质量不断变好。

上述实验没有考虑噪声的影响,实际上,填充因子降低意味着像元感光面积减小,而 CCD 的响应度、信噪比与像元的感光面积成正比,减小感光面积,会降低 CCD 的灵敏度、响应度、信噪比和动态范围等重要指标。在工程应用中,应综合考虑地面像元分辨率、调制传递函数、信噪比、灵敏度等指标要求,合理选择 CCD 的像元尺寸和填充因子。

灰度平均梯度(GMG)和拉普拉斯能量(EOL)是客观的无参考图像评价函数<sup>[12]</sup>,以单幅图像的梯度

信息为标准衡量图像的质量,能反映图像的对比度和纹理变化特征,在无噪声干扰情况下,其值越大表示图像层次越多、越清晰,图像质量就越好。计算不同填充因子时面阵 CCD 不同成像模式图像的 GMG 和 EOL,表 1、表 2、表 3、表 4 分别列出了填充因子分别为 100%、69%、44%、25% 时不同成像模式的 GMG 和 EOL。

表 1 填充因子为 100% 时不同成像模式的 GMG 和 EOL

Tab.1 GMG and EOL of different imaging mode for fill factor=100%

Fill factor=100%	Common imaging mode	Diagonal subpixel imaging mode	Four-point subpixel imaging mode
GMG	7.590 8	10.587 8	11.004 5
EOL	0.268 2	0.835 8	1.016 0

表 2 填充因子为 69% 时不同成像模式的 GMG 和 EOL

Tab.2 GMG and EOL of different imaging mode for fill factor=69%

Fill factor=69%	Common imaging mode	Diagonal subpixel imaging mode	Four-point subpixel imaging mode
GMG	8.073 7	11.868 1	12.437 5
EOL	0.330 2	1.269 2	1.654 0

表 3 填充因子为 44% 时不同成像模式的 GMG 和 EOL

Tab.3 GMG and EOL of different imaging mode for fill factor=44%

Fill factor=44%	Common imaging mode	Diagonal subpixel imaging mode	Four-point subpixel imaging mode
GMG	8.658 8	13.520 7	14.341 8
EOL	0.398 1	1.936 1	2.720 4

表 4 填充因子为 25% 时不同成像模式的 GMG 和 EOL

Tab.4 GMG and EOL of different imaging mode for fill factor=25%

Fill factor=25%	Common imaging mode	Diagonal subpixel imaging mode	Four-point subpixel imaging mode
GMG	9.237 4	15.145 4	16.157 7
EOL	0.468 9	2.816 2	4.212 9

为更直观地描述不同填充因子下各成像模式仿真图像的客观评价参数,图 9 和图 10 分别画出了填充因子为 100%、69%、44%、25% 时普通模式、对角错位模式、四点错位模式的 GMG 和 EOL,其横坐标  $n=1, 2, 3$  分别表示普通模式、对角错位模式、四点错位模式。

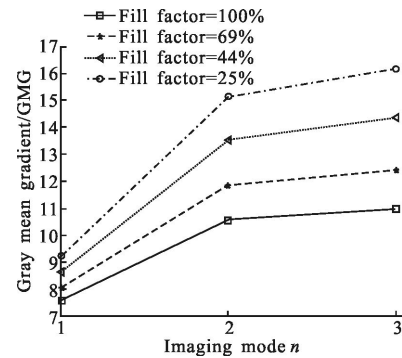


图 9 不同填充因子时各成像模式图像的 GMG

Fig.9 GMG of three imaging modes for different fill factor

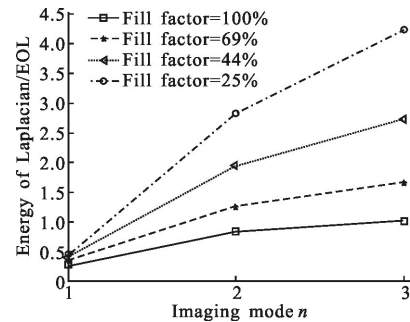


图 10 不同填充因子时各成像模式图像的 EOL

Fig.10 EOL of three imaging modes for different fill factor

## 4 结论

分析了面阵 CCD 错位成像技术的原理,介绍了面阵 CCD 普通成像模式、对角错位成像模式、四点错位成像模式的采样网格。建立了仿真不同填充因子的面阵 CCD 错位成像的数学模型,在 Matlab 平台上,对 ISO12233 标准分辨率测试卡子图像进行了填充因子分别为 100%、69%、44%、25% 的面阵 CCD 普通成像模式、对角错位成像模式以及四点错位成像模式的模拟仿真。

仿真结果表明,填充因子为 100% 时,与面阵 CCD 普通成像模式相比,面阵 CCD 对角错位、四点错位成像模式图像的灰度平均梯度分别提高了 2.997 0、3.413 6,拉普拉斯能量分别提高了 0.567 6、

0.747 8,且在填充因子为其他值时,普通成像模式、对角错位模式、四点错位模式图像的 GMG 和 EOL 均不断提高;与填充因子为 100%的面阵 CCD 四点错位模式相比,填充因子为 69%、44%、25%的面阵 CCD 四点错位模式图像的灰度平均梯度分别提高了 1.433 0、3.337 3、5.153 2,拉普拉斯能量分别提高了 0.638 0、1.704 4、3.196 8,且对于其他成像模式,填充因子为 100%、69%、44%、25%的图像的 GMG 和 EOL 均不断提高。研究表明,面阵 CCD 错位成像技术能够提高图像质量,且四点错位模式的图像质量优于对角错位模式;在满足信噪比指标要求下,对于面阵 CCD 同一成像模式,像元填充因子越小,图像质量越高。在工程应用时,应综合考虑地面像元分辨率、调制传递函数、信噪比等指标要求,合理选择 CCD 的像元尺寸和填充因子。提出的仿真 CCD 错位成像的数学模型,可以推广应用于评估其它错位成像模式,对 CCD 错位成像技术的工程应用具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Super-resolution reconstruction of Chang'e-1 satellite CCD stereo camera images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 404-408. (in Chinese)  
张磊, 杨建峰, 薛斌, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机影像超分辨率重建算法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 404-408.
- [2] Li Yapeng, He Bin. Quantitative evaluation of image quality of CCD subpixel imaging using MTF[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 443-448. (in Chinese)  
李亚鹏, 何斌. 采用 MTF 定量评估 CCD 错位成像的成像质量[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 443-448.
- [3] Latry C, Rouge B. In-flight commissioning of SPOT5 THR quincunx sampling mode [C]//SPIE, 2003, 4881: 189-199.
- [4] Skrbek W, Lorenz E. HSRS: an infrared sensor for hot spot detection [C]//SPIE, 1998, 3437: 167-175.
- [5] Miller J L, Wiltse J M. Benefits of microscan for staring infrared imagers [C]//SPIE, 2004, 5407: 127-138.
- [6] Wu Xinshe, Cai Yi. Techniques of optical microscan in staring infrared imaging system[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2007, 26(1): 10-14. (in Chinese)  
吴新社, 蔡毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 10-14.
- [7] Xu Chao, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Design of optical plate modulating microscanner based on staring imaging detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 27-31. (in Chinese)  
徐超, 金伟其, 王霞, 等. 基于凝视成像探测器的平板调制式微扫描器设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 27-31.
- [8] Zhao Xiuying, Wang Hongyu, Cong Fuzhong. Sub-pixel geometry image super-resolution algorithm [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(5): 795-798. (in Chinese)  
赵秀影, 王洪玉, 从福仲. 亚像元几何图像成像与超分辨率恢复算法[J]. 光学技术, 2010, 36(5): 795-798.
- [9] Xu Zhihai, Feng Huajun. Overview of research approaches for ultrahigh-resolution optoelectronic imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 456-463. (in Chinese)  
徐之海, 冯华君. 超高分辨光电成像技术的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 456-463.
- [10] Holst G C. Imaging system fundamentals [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(5): 052601-052601-10.
- [11] Robert D Fiete. Modeling the Imaging Chain of Digital Cameras [M]. Bellingham: SPIE Press, 2010: 189-203.
- [12] Wei H, Z Jing. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28: 493-500.