

基于折线采样的高分辨率成像系统设计

王胜春¹ 黄雅平^{1*} 罗四维¹ 吕国豪¹ 蒋欣兰²

(¹ 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)
(² 中国青年政治学院计算机科学与应用中心, 北京 100089)

摘要 针对现有的提高线阵电荷耦合器件(CCD)成像系统的图像空间分辨率的方法存在的不足,提出了一种新的采样模式,并设计了一种高分辨率成像系统。该系统利用两个相同的线阵 CCD 相机进行特定的空间排列,即使得相机 1 和相机 2 的 CCD 阵列都倾斜 θ 来进行扫描取像,并利用图像校正和像素插值等图像重建方法,得到高分辨率的图像。实验结果表明,倾斜角取 60° 的情况下,相对于单个线阵相机在 $\theta=0^\circ$ 的正常采样模式下得到的采样图像,图像的空间分辨率提高了 1 倍,且保持了成像的视野不变。本系统工程上实现简单,十分经济且便于维护,仅利用现有的成像装置即可获取更高分辨率的图像。

关键词 成像系统;高分辨率;折线采样;线阵电荷耦合器件

中图分类号 O439; TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0911003

Design of High-Resolution Imaging System Based on Doglegged Sampling

Wang Shengchun¹ Huang Yaping¹ Luo Siwei¹ Lü Guohao¹ Jiang Xinlan²

(¹ College of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)
(² Computer Science and Application Center, China Youth University for Political Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract For the shortcomings of methods used to improve the image spatial resolution of current linear charge coupled device (CCD) imaging system, a new sampling method is proposed, and a high-resolution imaging system is designed. Two same linear CCD cameras are fixed with specific spatial arrangement, namely both camera 1 and camera 2's CCD scan the object with a tilt angle θ , and image correction and pixel interpolation are also used for getting high-resolution image. The experimental results show that, compared with the regular scanning mode equipped with a signal camera and $\theta=0^\circ$, in our method cameras with slant angle $\theta=60^\circ$ enables the image spatial resolution doubled, and keeps the field of view unchanging. It is easy to realize the designed system in engineering, very economical and convenient to maintain it, and only using the existing imaging device to obtain higher-resolution images.

Key words imaging systems; high resolution; doglegged sampling; linear charge coupled device

OCIS codes 040.1520; 350.5730; 330.6130; 100.6640

1 引言

近几年来,线阵电荷耦合器件(CCD)由于其具有高集成度、高分辨率、高精度以及高灵敏度的特性^[1],已广泛应用于航天^[2]、遥感^[3]、安全及工业检测^[4,5]等领域。如何提高线阵 CCD 成像的空间分辨

率成为一个热点研究问题。针对这一热点问题,许多学者已经提出各种有效的解决方法^[6~8]。根据不同的研究出发点,这些方法可以总结为两大类,即基于成像原理的方法和基于采样模式的方法。前者主要是从成像原理的角度出发,通过增大光学系统的

收稿日期: 2012-03-14; 收到修改稿日期: 2012-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(60975078, 60902058, 61105119)、北京市自然科学基金(4112047)和中央高校基本科研业务费专项资金(2011JBZ005)资助课题。

作者简介: 王胜春(1985—),男,博士研究生,主要从事计算机视觉和高分辨成像等方面的研究。

E-mail: 09112069@bjtu.edu.cn

导师简介: 罗四维(1943—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事神经网络、机器学习和并行处理等方面的研究。

E-mail: swluo@bjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yphuang@bjtu.edu.cn

焦距或减小 CCD 像素尺寸来提高 CCD 像素分辨。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 器件像素尺寸也不能做得太小;后者则从 CCD 采样模式出发,通过改变 CCD 的采样方式,利用图像重建技术来实现高分辨力成像。国内外关于基于采样模式的方法已经作了许多研究工作,典型的代表有法国 SPOT-5HRG 相机采用的超模式采样^[9,10]、德国宇航中心研制的 HSRs 红外遥感器采用的高模式采样^[11],以及北京空间机电研究所提出的单线阵倾斜 45° 采样技术^[12]等。

超模式采样成像技术的关键在于如何精确地将两条相同的线阵 CCD 集成在一个器件中,使得它们沿着像素排列方向错开 0.5 pixel 位移,沿着扫描方向错开 $(n+0.5)$ (n 为正整数)的位移。这种采样方法要求两片 CCD 之间错开位移的误差不超过 $1/10 \sim 1/20$ pixel 的距离,以像素大小为 $10 \mu\text{m}$ 为例,则要求两片线阵 CCD 之间的错位误差必须控制在之间。因此,超模式采样技术的实现依赖于精密的器件集成技术,在 CCD 的实际集成过程中,对两条 CCD 之间的错位误差的控制有着极高的要求,如果误差不能控制在适当的范围内,就会对图像分辨率造成较大的影响。

高模式采样成像技术与超模式基本类似,不同之处在于高模式采样方法除了采用像素错排技术

外,还将线阵摄像机的扫描频率提高了一倍。但过高的扫描频率会导致其他硬件设备(马达编码器、运动控制卡、图像采集卡等)无法满足过快的取像速度,而升级这些硬件设备以适应高速数据采集和运动控制将造成很大的经济开销,且某些设备由于其性能瓶颈根本无法完成升级,因此依靠提高线扫描频率并不是一个很好的解决办法。

北京空间机电研究所提出的单线阵倾斜 45° 采样技术是一种全新的采样模式。通过将线阵 CCD 旋转 45°,使摄像设备沿着与线阵 CCD 像素排列方向呈 45° 的方向进行采样,提高了图像的空间分辨率,且克服了超模式和高模式采样技术中存在的 CCD 错位配准问题。但这种方法也存在明显的弊端,譬如摄像机的成像视野变窄,获取的图像信息变少,更重要的是这种方式下图像的空间分辨率并没有显著的提高,理论上仅为 1.19 倍,不能满足高分辨率成像的要求。

为了克服现有方法的不足,本文设计了一种基于折线扫描的高分辨率成像系统。该系统能够利用两个相同的线阵 CCD 成像装置,采用特定的空间扫描方式,并利用图像校正和像素插值等图像重建方法,使得采集图像的空间分辨率提高了 1 倍。

2 系统设计

2.1 系统的组成结构

图 1 为基于折线采样的高分辨率成像系统的组

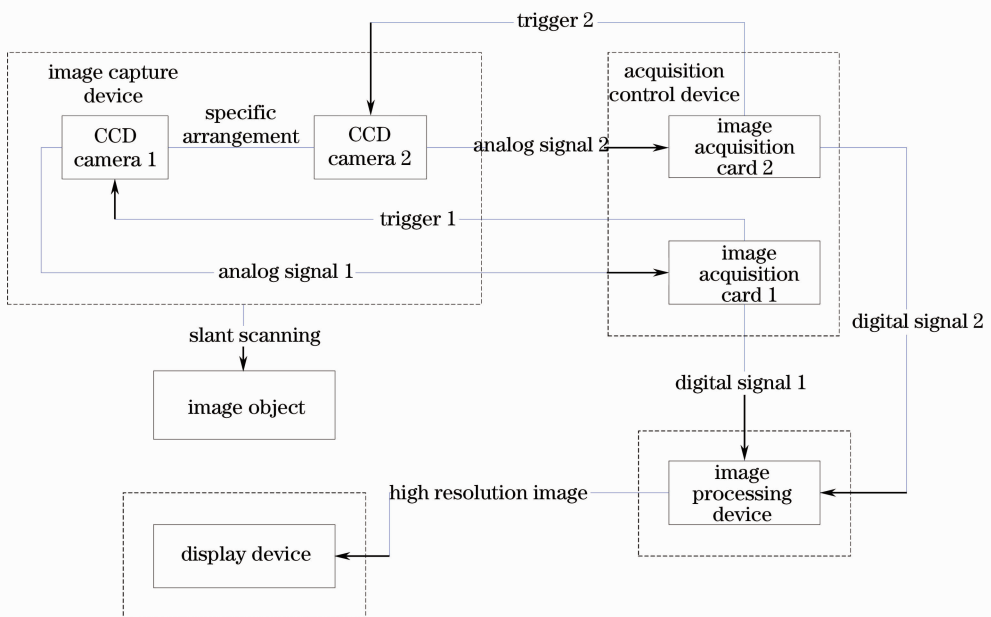


图 1 系统的组成结构图

Fig. 1 Structure diagram of the system

成结构图。它主要由图像采集装置、图像采集控制装置、图像处理装置和显示装置。图像采集装置由两个线阵 CCD 相机按照特定的空间排列组成；图像采集控制装置由两个图像采集卡组成，每个采集卡各控制一个 CCD 相机的图像采集过程；图像处理装置负责对采集到的图像数据进行重建；显示装置则用于显示得到的高分辨率图像。

2.2 系统的工作原理

该系统的基本工作原理如图 2 所示。工作步骤可以分为

1) 相机空间布局

将两个相同的线阵 CCD 相机进行特定的空间排列，即使得相机 1 和相机 2 的 CCD 阵列都以倾斜 θ 进行扫描取像，两个相机的扫描线整体呈现折线状，且扫描内容互不相交；

2) 触发取像

两个图像采集卡分别控制两个相机的采集过程，它们同时向两个线阵相机发送触发取像信号，两个线阵相机同时曝光；

3) A/D 转换

线阵 CCD 将光信号转换为模拟电信号传输至图像采集卡，图像采集卡完成 A/D 转换，将模拟电信号转化为数字图像信号输入图像处理装置，图像处理装置可以是可编程逻辑器件(PLD)，也可以是具有图像处理功能的计算机处理系统，根据实时性要求可以有针对性的进行选择；

4) 图像几何校正

由于相机的扫描过程始终存在一个角度，因此得到的图像必然存在几何失真。图像处理装置对输入的数字图像信号进行几何校正，具体包括两步：首先建立失真图像的像素点坐标和对应的实际物体上的采样点坐标间的映射关系，根据映射关系对图像各个像素坐标进行校正；经过初步坐标变换得到的图像其像素分布是不规则的，因此还需要利用像素插值的方法将图像的像素分布规则化。

完成图像几何校正(像素坐标变换和像素插值)后，并将图像进行拼接，便得到了高分辨率的数字图像。

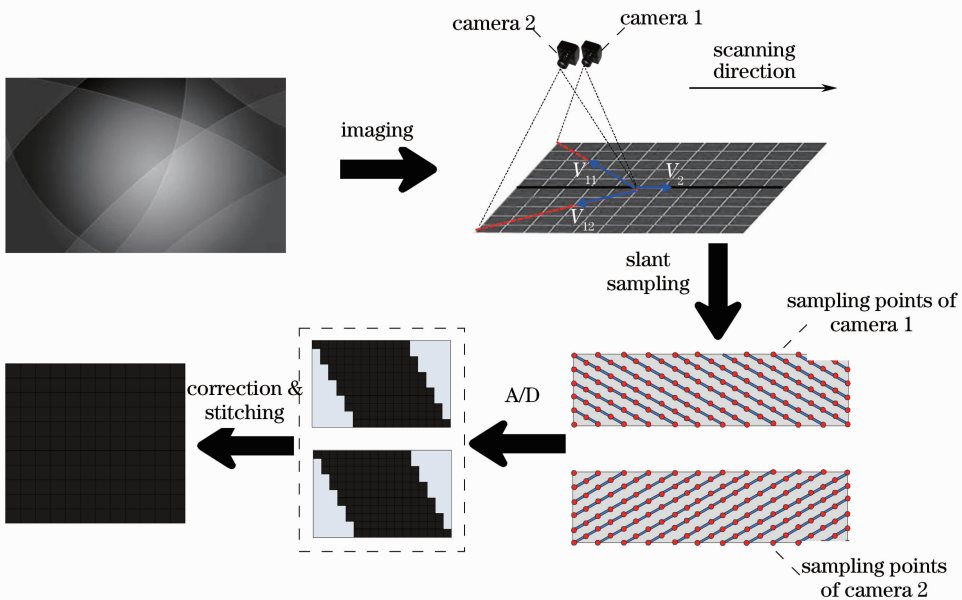


图 2 系统的工作原理图
Fig. 2 Function diagram of the system

3 系统分析

数字图像可以看作是对真实物体进行二维离散化采样得到的采样网格^[13]，对于线扫描成像设备，则分别沿着像素排列方向和相机扫描方向进行采样。图 3 为线扫描成像系统经常规扫描(即像素排列方向和相机扫描方向垂直)得到的方形网格，该网格可以定义为

$$G := \{n_1V_1 + n_2V_2 : n_1, n_2 \in \mathbf{R}\}, \quad (1)$$

式中 $V_1 = (p, 0), V_2 = (0, p \times n)$, p 为沿像素排列方向的采样间距, $p \times n$ 为沿相机扫描方向的采样间距, n_1, n_2 为采样点的坐标值。 V_1, V_2 组成了采样矩阵, 记为

$$M = [V_1, V_2], \quad (2)$$

而采样密度表示单位面积上采集的像素点的个数，

记为

$$\rho = \frac{1}{\det |\mathbf{M}|} \quad (3)$$

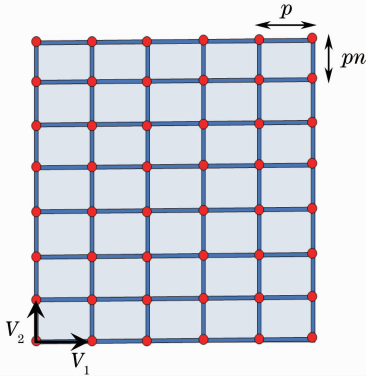


图 3 方形采样网格

Fig. 3 Square sampling grid

如图 4 所示, 相机 1 和相机 2 都以倾斜 θ 角度进行扫描取像, 设沿 CCD 像素排列方向的采样间距为 L , 沿相机扫描方向的采样间距为 LN , $N > 0$ 为一系数, 用来调节相机扫描方向的采样间距的大小。那么相机 1 和相机 2 的采样矩阵分别为

$$\mathbf{M}_1 = [V_{11}, V_{21}] = \begin{bmatrix} L \cos \theta & 0 \\ L \sin \theta & LN \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_2 = [V_{12}, V_{22}] = \begin{bmatrix} L \cos \theta & 0 \\ L \sin \theta & LN \end{bmatrix}, \quad (4)$$

则相机 1 和相机 2 的采样密度为

$$\rho_1 = \rho_2 = \frac{1}{\det |\mathbf{M}_1|} = \frac{1}{\det |\mathbf{M}_2|} = \frac{1}{NL^2 \cos \theta} \quad (5)$$

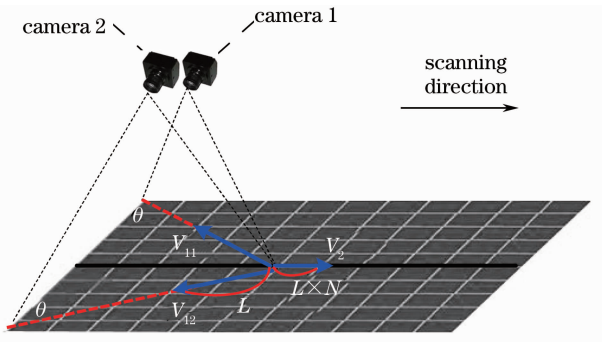


图 4 折线采样示意图

Fig. 4 Schematic of doglegged sampling

采样密度表示单位面积上采集的像素点的个数, 图像空间分辨率和采集密度成正比。从式中可以看出, 采样密度与 N 成反比, 而与 θ 角成正比。即 N 越小或 θ 越大, 采样密度就越大, 从而图像的空间分辨率就越高。减小 N 可以通过提高相机的扫描频率来实现, 但正如引言所述, 提高扫描频率并不是一个好

的解决方案。本文通过调整相机的空间位置, 使得线阵 CCD 倾斜 θ 角度对物体进行扫描采样, 如图 5 所示。从图中可以看到, 倾斜采样使得相机的成像视野由原来的 D 减小为 $D \cos \theta$, 且 θ 角越大, 相机的成像视野越小。因此, 综合考虑成像系统的分辨率和视野, 采用了两个相同的线阵 CCD, 且倾斜角 θ 取为 60° , 每个相机的视野为原来的 $1/2$, 采样密度提高了 1 倍, 将两个相机分别采集到的图像进行校正和拼接, 即可得到高分辨图像且保持视野不变。

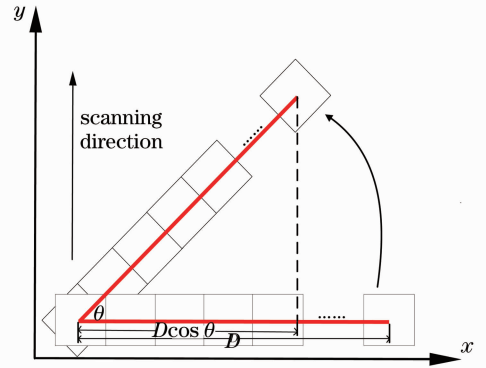


图 5 线阵相机的成像视野示意图

Fig. 5 Schematic of linear CCD camera's view of field of imaging

除成像空间分辨率外, 成像系统传递函数 (MTF) 是衡量成像质量的另一个重要指标。如图 6 所示, 将线阵 CCD 倾斜安置后, 成像器件与竖直方向存在一个角度。将倾斜方向上的所有采样点分别沿着水平和竖直方向投影, 倾斜方向上间隔为 p 的两个相邻采样点对应于水平方向上间隔为 $p \sin \theta$ 的相邻采样点和竖直方向上间隔为 $p \cos \theta$ 的相邻采样点。因此, 倾斜安置后的线阵 CCD 的相当于缩短了采样间距, 即提高了采样频率。对于同一个成像

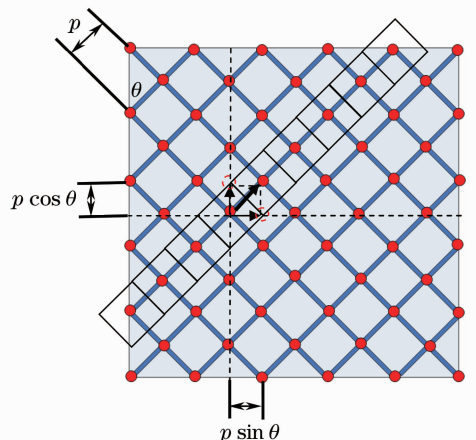


图 6 倾斜采样的投影示意图

Fig. 6 Schematic of slant sampling projection

系统,采样频率的提高必然导致 MTF 的下降,从而降低图像的成像质量。

从上面的分析可知,基于倾斜采样的成像方式虽然能够提高采样密度,但是相对于正常的采样模式,系统的 MTF 有所下降。增大 θ 角,则对应的水平方向采样间隔 $p\sin\theta$ 变大,水平方向的采样频率降低,但同时相应的垂直方向的采样间隔 $p\cos\theta$ 则变小,垂直方向的采样频率提高。因此,从直观上很难确定倾斜角 θ 与系统的 MTF 的关系。参考已有的关于因器件采样而产生的 MTF 的研究成果^[14~16],可以得到由倾斜采样产生的 MTF 为

$$F_{\text{slant}}(f) = \text{sinc}(\pi fa) \text{sinc}[2\pi fb \sin(\theta/2)], \quad (6)$$

式中 f 为空间频率,单位为 lp/mm; a 为竖直采样间距, b 为水平采样间距,单位为 mm。

为便于分析,令 $a = b = 0.03 \text{ mm}$,则不同倾斜角度下的采样 MTF 曲线如图 7 所示。

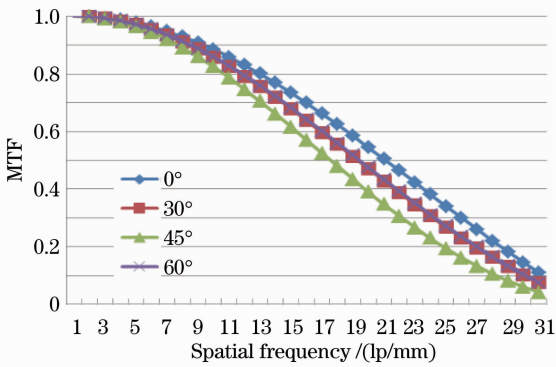


图 7 不同倾斜角度下的采样 MTF

Fig. 7 Sampling MTF with different slant angles

从图中可以明显观察到,虽然倾斜角度不为零时的 MTF 都有所下降,但倾斜 60° 和倾斜 30° 采样的 MTF 都要高于倾斜 45° 采样,且倾斜 60° 和倾斜 30° 采样的 MTF 相同。因此,相对于倾斜 45° 采样,该采样方法的 MTF 具有更高的值,成像质量更佳。

如图 8 所示,相机的扫描过程始终存在一个角度,而线阵相机的扫描线是以列或行的形式输出至图像,因此得到的图像必然存在几何失真。图像处理装置对输入的数字图像信号进行几何校正,是实现高分辨成像的关键一步,主要包括两个步骤:

1) 像素坐标变换。建立失真图像的像素点坐标和对应的实际物体上的采样点坐标间的映射关系,根据映射关系对图像各个像素坐标进行校正。

图 8 为相机的二维采样空间,图中每个小圆点代表一个采样点,记作 $S(x,y)$ ($x = 1, 2, \dots, m$; $y = 1, 2, \dots, n$),图 9 为实际的空间采样点在失真图

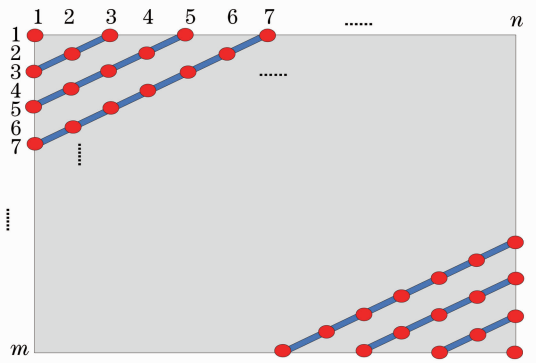


图 8 线阵相机的二维空间采样示意图

Fig. 8 Schema of 2D spatial sampling linear CCD camera

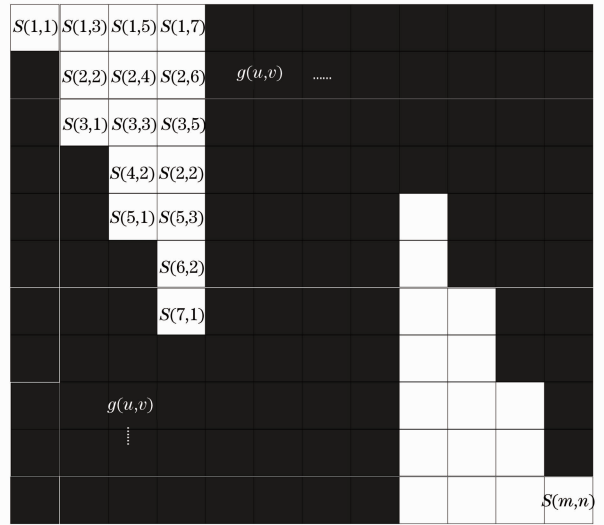


图 9 失真图像中的像素位置分布图

Fig. 9 Pixel location distribution of distorted image

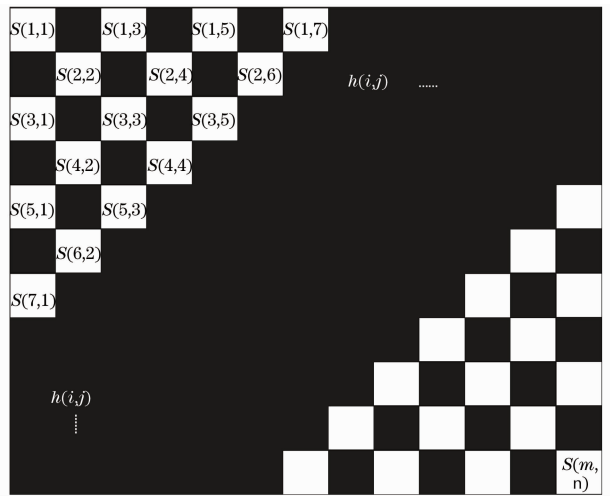


图 10 校正图像中的像素位置分布图

Fig. 10 Pixel location distribution of corrected image

像中的位置,像素坐标变换就是通过将失真图像中的像素值进行重新分配坐标位置,使得图像的像素分布与相机的采样空间的采样点的分布相一致,从

而得到如图 10 所示的校正图像。令失真图像为 $g(u, v)$, 校正图像为 $h(i, j)$, 则可通过下式实现像素坐标变换

$$h(i, j) = \begin{cases} g\left(i, \frac{i+j}{2}\right) & i \text{ and } j \text{ are both odd or even} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} h(2i-1, 2j) = \frac{1}{4} [h(2i-2, 2j) + h(2i, 2j) + h(2i-1, 2j-1) + h(2i-1, 2j+1)] \\ h(2i, 2j-1) = \frac{1}{4} [f(2i-1, 2j-1) + h(2i+1, 2j-1) + h(2i, 2j-2) + h(2i, 2j)] \end{cases} \quad (8)$$

按照上述方法将相机 1 和相机 2 采集到的图像数据进行校正后, 最后还需要将这两幅独立的高分辨率图像进行拼接, 从而在提高分辨率的同时保持成像系统的视野不变。

完成图像的校正和拼接后, 得到完整的高分辨率图像, 此时就可以将图像输出至显示装置显示出来。

4 实验仿真与结果

通过实验对本文设计的高分辨率成像系统的成像效果进行实验仿真, 从而验证其有效性。为了在仿真过程能够真实反应各种光学成像效应, 输入图像的分辨率应至少是生成图像分辨率的 4 倍^[17], 因此可以选用一幅高分辨率图像来模拟实际的待成像物体。

实验平台为 Matlab 7.9.0, 为使仿真结果更可靠, 选用按照 ISO12233 标准建立的分辨率测试图作为实验的输入。图 11(a) 为一幅分辨率为 1000×1000 的灰度测试图像, 按照提出的双线阵折线采样方法对其进行采样。设沿 CCD 像素排列方向的采样间距 $L=10$, 倾斜角 $\theta=60^\circ$, 沿相机扫描方向的采样间距为 $LN=10 \times 1=10$, 则相机 1 和相机 2 的采样矩阵为

$$\begin{aligned} [V_{11}, V_2] &= \begin{bmatrix} 10\cos 60^\circ & 0 \\ 10\sin 60^\circ & 10 \end{bmatrix}, \\ [V_{12}, V_2] &= \begin{bmatrix} 10\cos 60^\circ & 0 \\ 10\sin 60^\circ & 10 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

图 11(b1) 为相机 1 倾斜采样得到的失真图像; 图 11(b2) 为对图 11(b1) 中的图像进行像素坐标变换得到的校正图像, 可以明显观察到图像中存在许多黑色的待插值像素点; 图 11(b3) 为对图 11(b2) 中的图像进行线性插值后得到的图像。

图 11(c1) 为相机 2 倾斜采样得到的失真图像;

2) 像素插值. 经过初步坐标变换得到的图像其像素分布是不规则的, 具体表现为当图像中的横纵坐标值的奇偶性不同时, 这些位置是没有像素值的, 因此还需要利用像素插值的方法将图像的像素分布规则化。如图 10 所示, 黑色小方框表示待插值的像素点位置, 采用线性插值法完成插值, 即

图 11(c2) 为对图 11(c1) 中的图像进行像素坐标变换得到的校正图像, 同样图像中存在许多黑色的待插值像素点; 图 11(c3) 为对图 11(c2) 中的图像进行线性插值后得到的图像。

将图 11(b3) 与图 11(c3) 进行拼接, 得到了图 11(d2) 所示的图像, 图像分辨率为 200×200 。

图 11(d1) 为单个线阵相机沿 CCD 像素排列方向的采样间距 $L=10$, 倾斜角 $\theta=0^\circ$, 沿相机扫描方向的采样间距为 $LN=10 \times 1=10$ 时得到的采样图像, 此时即相机的线扫描方向与 CCD 像素排列方向垂直, 采样矩阵为

$$[V_1, V_2] = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

这种采样模式称为正常采样模式, 该模式下得到的图像的分辨率为 100×100 。

通过比较图 11(d1) 和图 11(d2), 可以看出本系统确实能够利用当前分辨率的相机实现更高分辨率成像。

图 11(d3) 为单个线阵相机在沿 CCD 像素排列方向的采样间距 $L=5$, 倾斜角 $\theta=0^\circ$, 沿相机扫描方向的采样间距为 $LN=5 \times 1=5$ 时得到的采样图像, 相当于将 CCD 像素个数和相机的扫描频率都提高 1 倍, 此时的采样矩阵为

$$[V_1, V_2] = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

得到的图像的分辨率为 200×200 。

为了评价本系统的成像质量, 将使用相对均方根误差来度量图 11(d2) 与图 11(d3) 之间的差别, 即衡量本系统利用两个较低分辨率的相机在较低的扫描频率下所成的像, 与一个高分辨相机在高扫描频率下所成的像之间的差距。相对均方根误差定义为

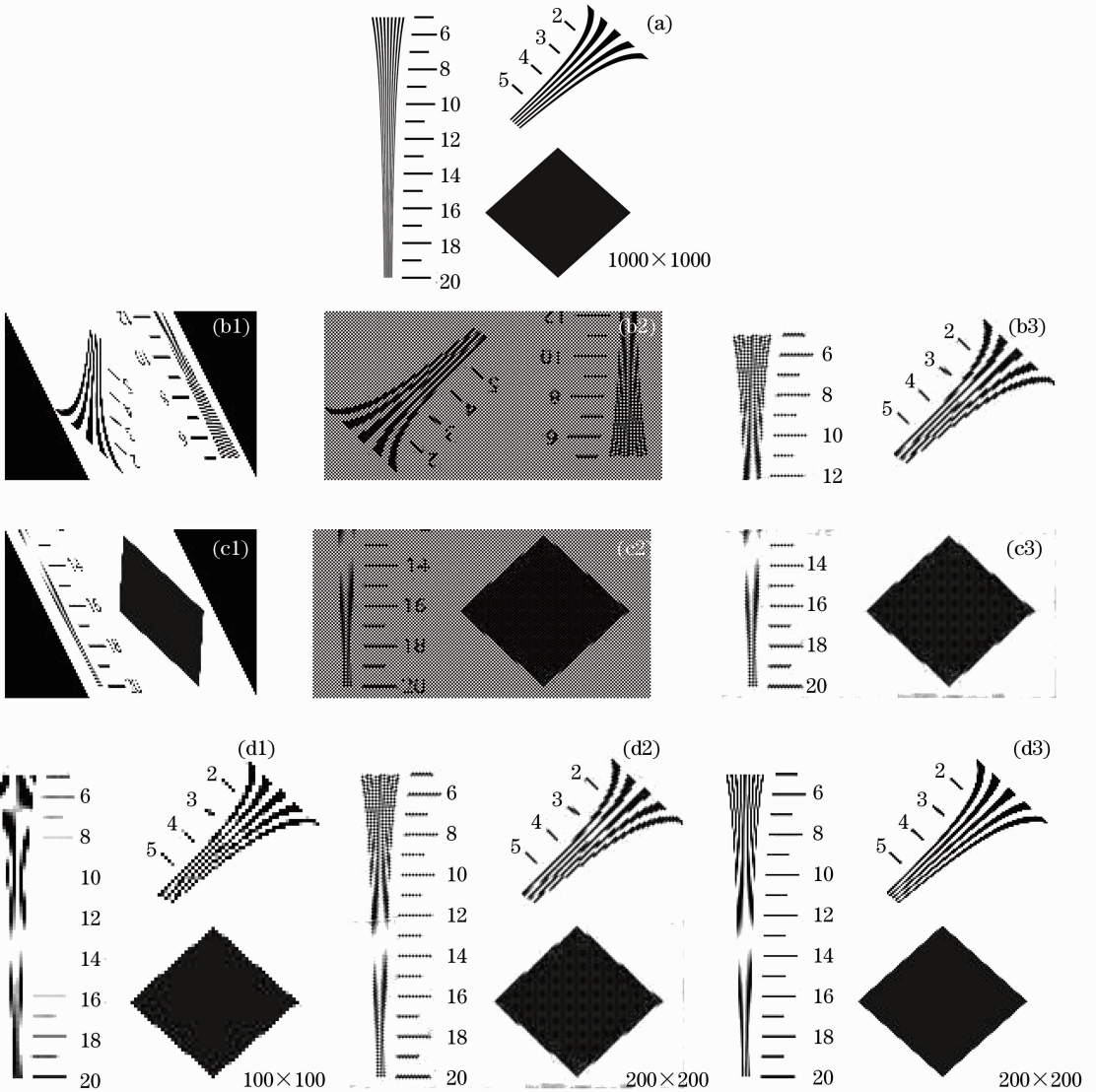


图 11 实验仿真图像。(a)标准分辨率测试图;(b1),(c1)失真图像;(b2),(c2)校正后的图像;(b3),(c3)插值后的图像;
(d1)正常的采样图像;(d2)由本文方法得到的图像;(d3)采样频率加倍后正常采样的图像

Fig. 11 Simulation images; (a) Standard resolution test chart; (b1), (c1) distorted images; (b2), (c2) corrected images;
(b3), (c3) interpolated images; (d1) an image obtained by regular sampling; (d2) image obtained by our sampling
method; (d3) an image obtained by regular sampling whose scan frequencies are doubled

$$E_{NMS} = \frac{\|A - A^0\|}{\|A^0\|}, \quad (12)$$

式中 A 代表图 11(d2)中的图像, A^0 代表图 11(d3)中的图像。

通过计算,得到 $E_{NMS}=0.0293$,即 A 与 A^0 仅相差 2.93%。因此利用该系统得到的图像近似于一个高分辨相机在高扫描频率下所成的像,从而验证了该高分辨率成像系统的有效性。

5 结 论

基于线阵 CCD 的采样模式,设计了一种基于折

线采样的高分辨率成像系统,并通过仿真实验验证了该系统的有效性。与现有的实现高分辨率成像的方法,如超模式采样/高模式采样以及倾斜 45° 采样等方法相比,该系统采用的折线采样方法具有以下优点:

- 1) 工程上实现简单,只需将两个相同的线阵 CCD 进行简单的空间布局即可实现图像空间分辨率的提高,且可以保持成像的视野不产生变化;
- 2) 无需更改相机自身结构以及任何硬件设备,十分经济,且便于维护;
- 3) 提供了一个开放式的高分辨率成像框架,便

于扩展,通过升级两个线阵 CCD 相机(如将单线阵 CCD 相机升级为超分辨率相机),可以达到更高的图像分辨率。

参 考 文 献

- 1 Zeng Guangyu, Zhang Zhiwei, Zhang Cunlin. Photoelectric Sensor Technology (2nd edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009
曾光宇, 张志伟, 张存林. 光电检测技术(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2009
- 2 Zhao Baochang, Wen Desheng, Yang Jianfeng *et al.*. Two bore-sight stereo mapping with single lens, TDI CCD pushing model imaging and compensations of the speed-to-height rate—Chang'e-2 CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900115
赵葆常, 汶德胜, 杨建峰等. 单镜头两视角同轨立体成像、TDI CCD 自推扫和速高比补偿——嫦娥二号 CCD 相机技术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900115
- 3 Xing Shuai, Xu Qing, He Yu *et al.*. Combined stereo location among multi-sensor remote sensing image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, **34**(5): 522~526
邢帅, 徐青, 何钰等. 多源遥感影像“复合式”立体定位的研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, **34**(5): 522~526
- 4 Xu Xinhua, Wang Qing, Qian Zheng *et al.*. Automatic measurement system of invar rods based on image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1519~1522
徐新华, 王青, 钱峥等. 基于图像处理的钢尺自动检测系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1519~1522
- 5 Qingyong Li, Shengwei Ren. A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads[J]. *IEEE Trans. Instrum. & Measure.*, 2012, pp(99): 1~11
- 6 Wang Heshun, Chen Cichang, Huang Weigong. Research on the method of high accuracy measurement by use of low accuracy CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1488~1492
王和顺, 陈次昌, 黄惟公. 用低精度 CCD 获得高精度测量方法的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1488~1492
- 7 Zhuo Ning, Sun Huayan, Zhang Haijiang. A new approach for improvement of CCD imaging resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 777~780
卓宁, 孙华燕, 张海江. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 777~780
- 8 Xu Zhengping, Zhai Linpei, Ge Wenqi *et al.*. CCD geometric superresolution method based on subpixel[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2447~2453
徐正平, 翟林培, 葛文奇等. 亚像素的 CCD 几何超分辨率方法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2447~2453
- 9 A. Bouillon, E. Breton, F. De Lussy *et al.*. SPOT5 HRG and HRS first in-flight geometric quality results [C]. *SPIE*, 2003, **4881**, 212~223
- 10 C. Latry, B. Rouge. In flight commissioning of SPOTS THR quincunx sampling mode [C]. *SPIE*, 2003, **4881**: 189~199
- 11 W. Skrbek, E. Lorenz. HRS—an infrared sensor for hot-spot-detection[C]. *SPIE*, 1998, **3437**: 167~175
- 12 Zhou Feng, Wang Huaiyi, Ma Wenpo *et al.*. A study on a new method for improving image spatial resolution of sampled optical imager with single array[J]. *J. Astronautics*, 2006, **27**(2): 227~232
周峰, 王怀义, 马文坡等. 提高线阵采样式光学遥感器图像空间分辨率的新方法研究[J]. *宇航学报*, 2006, **27**(2): 227~232
- 13 A. Almansa, S. Durand, B. Rongé. Measuring and improving image resolution by adaptation of the reciprocal cell [J]. *J. Mathematical Imaging and Vision*, 2004, **21**(3): 235~279
- 14 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2891~2897
李铁成, 陶小平, 冯华君等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2891~2897
- 15 Zheng Yuhui, Tang Yang, Chen Qiang *et al.*. A method for increasing effective resolution of tilting mode satellite image[J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2009, **21**(2): 243~249
郑钰辉, 汤杨, 陈强等. 提高斜模式遥感图像有效分辨率的方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, **21**(2): 243~249
- 16 Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda *et al.*. Experimental research on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-mode scanning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1011001
丁胜晖, 李琦, 李运达等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1011001
- 17 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1111004
徐保树, 史泽林, 冯斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1111004

栏目编辑: 李文洁