

文章编号 1004-924X(2014)08-2026-06

光学掩模实现几何超分辨成像的仿真

刘晶丹^{1*}, 许廷发¹, 荀显超², 刘子伟¹, 王洪庆¹, 饶志涛¹

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 空军航空大学 飞行基础训练基地基础部, 吉林 长春 130022)

摘要: 将基于实际 CCD 模型的频谱编码方法引入光电成像系统, 以克服 CCD 对空间分辨率的限制, 实现几何超分辨成像。介绍了光学掩模实现几何超分辨成像的工作原理, 基于实际的 CCD 模型在 $4f$ 成像系统的频谱面上放置光学编码掩模来提高图像分辨率。对该成像系统模型进行了数学分析, 从理论上证明了这种基于实际 CCD 模型的频谱编码方法的有效性。根据建立的理论完成了基于一维光学编码掩模方法的仿真实验。仿真结果表明: 提出的方法能实现几何超分辨成像, 解决了光电成像系统中因 CCD 欠采样造成的物频谱混叠和因像素尺寸非零而造成的低通效应问题。与传统的超分辨方法相比, 该方法的系统结构简单、易实现。

关键词: 几何超分辨; 超分辨成像; 光学掩模; 频谱编码; CCD 实际模型

中图分类号: O438.2; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2026

Simulation of geometric superresolution imaging by using optical mask

LIU Jing-dan^{1*}, XU Ting-fa¹, XUN Xian-chao², LIU Zi-wei¹, WANG Hong-qing¹, RAO Zhi-tao¹

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of the Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Basic Department of Basic Flight Training Base, Air Force Aviation University, Changchun 130022, China)
* Corresponding author, E-mail: superdan1988@126.com

Abstract: A frequency spectral coding method based on a practical CCD model was added into a photo-electronic imaging system to overcome the CCD limitation on spatial resolution and to achieve geometric superresolution imaging. The working mechanism of the geometric superresolution imaging with an optical mask was introduced. On the basis of the practical CCD model, the optical mask was placed on the Fourier transform plane of the $4f$ imaging system to improve the image resolution. A mathematical model of the imaging system was established and rigidly analyzed. The proposed frequency spectral coding method based on the CCD practical model was demonstrated to be validly in theory. Mathematical modeling and simulation on the proposed method in one dimensional optical mask were performed. Simulation results show that this method enable to solve the spectral aliasing caused by the separations among the pixels and the low-pass effect due to the CCD nonzero pixel size. To com-

收稿日期: 2013-09-25; 修订日期: 2013-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61172178); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20121101110022); 国家自然科学基金仪器专项资助项目 (No. 61027002)。

pare with the conventional approach, this new method is much easy to implement and has a simple structure.

Key words: geometric superresolution; superresolution imaging; optical mask; spectrum encoding; CCD practical model

1 引 言

超分辨技术能够提高成像系统的空间分辨力,因此在对地观测、国防乃至生命科学领域都有着广泛的应用,也是目前光学领域的研究热点^[1]。在许多实际成像系统中,限制成像系统空间分辨能力的因素有很多,其中主要的因素是衍射。一般解决由衍射造成的分辨率限制的技术称为衍射超分辨技术。衍射发生在光瞳和透镜系统的边缘,许多技术可以减小这种效应,但它不能完全被消除。另外,限制成像系统空间分辨能力的因素还有 CCD 探测器阵列的几何尺寸。它对图像分辨率的限制分为两类:第一类是 CCD 两相邻像素中心之间的距离和采样点数目。相邻像素之间的距离越小,CCD 所得的图像质量越高,反之亦然;第二类是 CCD 每个像素的大小和形状。因为 CCD 并不是理想的采样阵列,每个像素对撞击到其区域上的光能量进行累积和转换,这种发生在每个像素位置的局部空间累积引起了低通效应,像素的尺寸越大,这种低通效应就越严重。尽管如此,制造商还是倾向于生产这种大尺寸像素的 CCD,以得到更高的信噪比,因此第二类因素成为限制几何分辨率的常见问题。

为了突破由 CCD 探测器几何尺寸造成的分辨率限制,近年来,研究人员提出了多种几何超分辨技术。传统方法是微扫描法^[2],它通过对同一场景进行多次采样,用多幅相互之间有微小位移的时间序列低分辨率图像重建高分辨率图像。但这种方法需要额外的运动部件或是摆镜,系统很复杂;并且重建高分辨率图像是一个有难度的过程。因此,国内外研究人员提出了一些实现几何超分辨的新方法^[3-10],这些新方法的优势在于不需要利用额外的运动部件。文献^[3]提出了在成像系统的傅里叶变换平面放置一个掩模,这个掩模对物频谱进行编码,成像之后再对像频谱进行解码。加掩模的方法可以克服由 CCD 两相邻像

素中心间距离引起的频谱混叠问题。但该方法忽略了 CCD 像素大小,将 CCD 像素看成理想的点,并没有解决由 CCD 每个像素的大小和形状引起的低通效应问题。本文结合实际的 CCD 模型和现有的掩模编码方法,提出了一种能够同时解决 CCD 欠采样以及由像素大小引起的图像分辨率退化问题的新方法。

2 实际的 CCD 模型及其对图像分辨率的影响

CCD 的成像过程就是对物体的离散采样过程。在理想条件下,假设 CCD 像素的大小远小于相邻像素中心之间的距离,即可忽略 CCD 像素的大小^[3]。理想条件下,CCD 可看成是 delta 函数序列,表达式为:

$$\text{CCD}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nX). \quad (1)$$

但在实际的成像系统中,理想条件下的假设是不存在的^[8]。为了获得高的信噪比,CCD 的像素必须是大尺寸的。假设 CCD 相邻像素间的距离是 X ,像素宽度是 Δd 。实际情况下,CCD 的实际模型可看成是 delta 函数序列与宽度是 Δd 的 rect 函数卷积,表达式为:

$$\text{CCD}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nX) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right), \quad (2)$$

其中: \otimes 表示卷积运算。

式(2)给出了 CCD 实际模型的表达式,然后从两方面讨论 CCD 对图像分辨率的影响。假设坐标 x 表示空域,坐标 v 表示频域。对式(2)的左右两边做傅里叶变换得:

$$\text{CCD}(v) = \mathfrak{F}\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nX)\right\} \mathfrak{F}\left\{\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right)\right\}, \quad (3)$$

其中: $\mathfrak{F}\{\}$ 表示求 $\{\}$ 中函数的傅里叶变换。又因为:

$$\mathfrak{F}\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(x-nX)\right\}=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-n\Delta\nu),$$

$$\mathfrak{F}\left\{\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right)\right\}=\text{Sinc}(\Delta d\nu).$$

其中: $\Delta\nu=1/X$ 。式(3)变为:

$$\text{CCD}(\nu)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-n\Delta\nu)\text{Sinc}(\Delta d\nu). \quad (4)$$

式(4)为在频域中 CCD 几何尺寸对图像分辨率影响的数学表达式。其中,第一项由 CCD 相邻像素中心间的 delta 距离所产生的函数序列的频域表示,它决定了 CCD 对物频谱的采样过程是否会发生物频谱混叠, CCD 的相邻像素中心间距越小,即 x 越小,则 $\Delta\nu$ 越大,可抑制频谱混叠的发生。因此,若想消除频谱混叠造成的图像退化,需要想办法减小 x 。第二项则是由 CCD 像素大小所产生的 Sinc 函数, Sinc 函数存在零点,因此 Sinc 函数是低通调制函数,即把第二项看作是第一项的权重。

3 掩模编码实现几何超分辨原理

如图 1 所示,在 $4f$ 成像系统中,物放置于第一个透镜的前焦平面,在第一透镜的后焦平面上将产生物的傅里叶变换后的结果,将后焦平面称为傅里叶频谱面。在该面上放置一个光学掩模,作用是允许一部分频率信息通过成像系统传输。 $4f$ 系统的第二个透镜对经过光学掩模采样的物频谱做傅里叶逆变换,在其后焦平面上得到像。CCD 放置于第二个透镜的后焦平面上,像则成在 CCD 面上。建立 $4f$ 系统成像过程的一维数学模型,二维数学模型直接推广得到。

假设输入物表示为 $g(x)$,其傅里叶变换表示为 $G(\nu)$,二者的关系为:

$$G(\nu)=\mathfrak{F}\{g(x)\}. \quad (5)$$

光学掩模表示为 $\text{OM}(\nu)$, $\text{OM}(\nu)$ 也称为编码掩模。由于光学掩模放置于系统的频谱面,坐标为 ν ,那么有:

$$O(\nu)=G(\nu)\text{OM}(\nu). \quad (6)$$

放置于频谱面的光学掩模是一维振幅型光栅,它用周期为 p 的 delta 函数序列表示。其数学表达式为:

$$\text{OM}(\nu)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp), \quad (7)$$

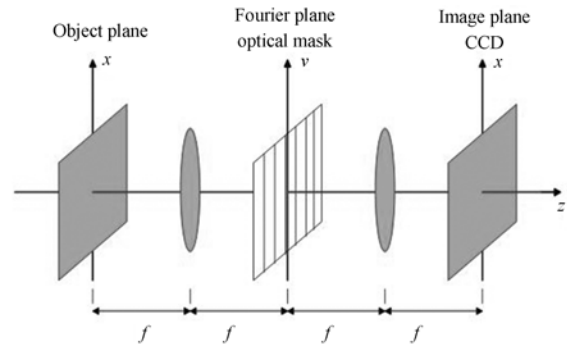


图 1 在频谱面放置光学掩模的成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of imaging system with optical mask in Fourier plane

因此,式(6)可变为:

$$O(\nu)=G(\nu)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp). \quad (8)$$

$4f$ 系统中的第二个透镜对式(8)做傅里叶逆变换,在第二个透镜的后焦平面上所得的像可以表示为:

$$O(x)=\mathfrak{F}^{-1}\left\{G(\nu)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp)\right\}. \quad (9)$$

用放置于第二个透镜后焦平面上的 CCD 对图像进行采样。此处考虑的是 CCD 的实际模型,即 CCD 表示为式(2)的形式, CCD 采样后的图像可表示为:

$$S(x)=O(x)\text{CCD}(x)=\mathfrak{F}^{-1}\left\{G(\nu)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp)\right\}\times\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(x-nX)\otimes\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right)\right\}. \quad (10)$$

依据文献[4], CCD 的相邻像素的中心距离 X 与光学掩模的周期 p 之间的关系为 $X=1/(\Delta\nu+p/2)$,其中 $\Delta\nu$ 表示输入物频谱的半宽度。根据这个关系式选择光学掩模周期。 $S(x)$ 表示 CCD 采样后获得的图像。在频域中处理所得的图像以消除 CCD 几何尺寸导致的图像退化。对式(10)做傅里叶变换得:

$$S(\nu)=\mathfrak{F}\{O(x)\text{CCD}(x)\}=\mathfrak{F}\left\{\mathfrak{F}^{-1}\left\{G(\nu)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp)\right\}\times\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(x-nX)\otimes\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right)\right\}\right\}=\mathfrak{F}\left\{\mathfrak{F}^{-1}\left\{G(\nu)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp)\right\}\right\}\otimes\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(x-nX)\otimes\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right)\right\}=\left\{G(\nu)\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(\nu-kp)\right\}\otimes\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(x-nX)\otimes\text{rect}\left(\frac{x}{\Delta d}\right)\right\}$$

$$\left\{ \mathfrak{F} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-nX) \right] \mathfrak{F} \left[\text{rect} \left(\frac{x}{\Delta d} \right) \right] \right\} = \left\{ G(v) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(v-kp) \right\} \otimes \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) \right] \text{Sinc} C(\Delta d v) \right\}. \quad (11)$$

由于 $\text{Sinc}(\Delta d v)$ 可看作是 delta 函数序列的权重, $\text{Sinc}(\Delta d v)$ 只随 v 的变化来改变 delta 函数序列的振幅。在对图像用解码掩模(与编码掩模完全相同)做解码之前,需要先消除这种因 CCD 像素大

小不为零而引起的低通效应。具体的方法是对式(11)的第二项乘以 $\text{Sinc}(\Delta d v)$ 的倒数,此时有:

$$S(v) = \left\{ G(v) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(v-kp) \right\} \otimes \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) \right] \right\}. \quad (12)$$

用解码掩模对式(12)做解码,以消除因 CCD 欠采样引起的频谱混叠。首先利用函数 delta 的性质将式(12)变为:

$$S(v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ G \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) \right] \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) - kp \right] \right\}. \quad (13)$$

其次,用解码掩模(此处使用的解码掩模与编码掩模相同)与式(13)相乘,得:

$$R(v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ G \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) \right] \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) - kp \right] \right\} \times \text{OM}(v). \quad (14)$$

两个 delta 函数相乘,只有在两者同时不为零的点才会取非零值,此处的 n 取偶数,式(14)变为:

$$R(v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} G \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) \right] \delta \left[v-n \left(\Delta v + \frac{p}{2} \right) - kp \right]. \quad (15)$$

取 $n=0$,得原始物的离散频谱,即:

$$R(v) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(v) \delta(v-kp). \quad (16)$$

对式(16)做插值运算即可获得原始物的频谱。因此,从 $R(v)$ 可得到 $G(v)$,再对 $G(v)$ 做傅里叶逆变换得到输入物。

4 仿真及结果分析

假设输入物为高斯函数,如图 2(a)所示。输入函数的傅里叶变换如图 2(b)所示。在 $4f$ 系统的第一个透镜的后焦平面上放置一个光学编码掩模,光学编码掩模如图 2(c)所示,它是一个周期 $p=2$ 的一维振幅型光栅。输入物频谱与编码掩模的乘积,即对物频谱的采样结果如图 2(d)所示。对采样的输入物频谱做傅里叶逆变换得到 $4f$ 系统所成的像,如图 2(e)所示。在 $4f$ 系统像平面上放置 CCD,CCD 采集到的图像如图 2(f)所示。

在频域中对 CCD 得到的图像做处理。假设

$4f$ 成像系统中 CCD 的像素尺寸为 $16 \mu\text{m}$,对 CCD 采集到的图像做傅里叶变换,所得的图像频谱结果如图 2(g)所示。从频域中看,CCD 采样的过程即是对输入物频谱在相应的 CCD 像素位置上做复制,因 CCD 相邻像素间的距离过大,在频域中会产生输入物频谱的重叠。同时,由于 CCD 像素是有一定尺寸的,因此经 CCD 采样所得到的物频谱并不是等振幅大小的,而是被 Sinc 函数调制的频谱。为了消除 CCD 几何尺寸对图像的影响,首先用权重的倒数乘以 CCD 图像频谱,结果如图 2(h)所示;其次,用与编码掩模相同的掩模作为解码掩模乘以上一步处理后的结果,结果如图 2(i)所示,经以上处理得到的结果没有物频谱混叠发生。图 2(j)、2(k)分别是对图 2(i)所得结果做滤波、插值处理的结果图,经这两步处理即得到输入物的频谱。对图 2(k)的结果做傅里叶逆变换得输入物,如图 2(l)所示,可见结果与图 2(a)相似。

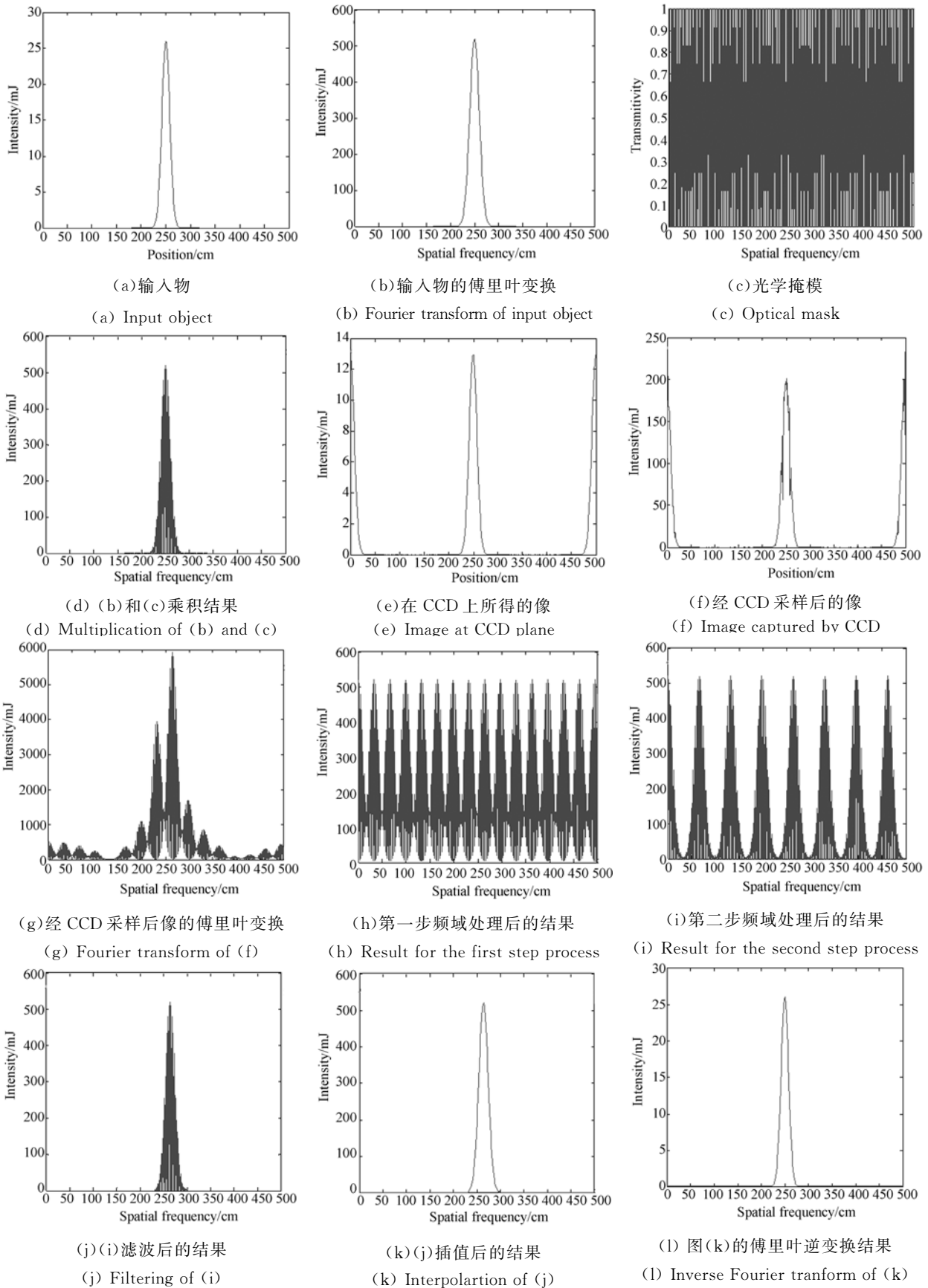


图 2 仿真结果图

Fig. 2 Simulation results

5 结 论

本文根据 CCD 实际模型,结合光学掩模编码的方法,提出了利用光学掩模提高成像系统几何

分辨率的改进方法。该方法同时考虑了 CCD 的相邻像素间距离和像素尺寸对图像分辨率的影响,通过理论推证和仿真,证明了改进方法能解除 CCD 几何尺寸对分辨率的限制。与传统的微扫描方法相比,该方法简单、灵活、易实现。

参考文献:

- [1] ZALEVSKY Z, MICO V, GARCIA J. Nanophotonics for optical superresolution from an information theoretical perspective: a review [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2009, 3(1): 1-18.
- [2] PELEG S, KEREN D, SCHWEITZER L. Improving image resolution using subpixel motion [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 5(3): 223-226.
- [3] SOLOMON J, ZALEVSKY Z, MENDLOVIC. Geometric superresolution by code division multiplexing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1): 32-40.
- [4] SOHAIL M, MUDASSAR A A. Geometric superresolution by using an optical mask [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(16):3000-3006.
- [5] SOHAIL M, MUDASSAR A A. Geometric superresolution using an optical rectangular mask [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 1-6.
- [6] ZALEVSKY Z, SHAMIR N, MENDLOVIC D. Geometrical superresolution in infrared sensor: experimental verification [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(6):1401-1406.
- [7] BORKOWSKI A, ZALEVSKY Z, JAVIDI B. Geometrical superresolved imaging using nonperiodic spatial masking [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, 26(3):589-601.
- [8] 陶然,杜述松,张文喜. 频谱编码超分辨率成像分析与仿真[J]. *光电工程*, 2012, 39(6): 17-21.
- TAO R, DU SH S, ZHANG W X. Analysis and simulation of superresolution by code division multiplexing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6): 17-21. (in Chinese)
- [9] 贾平,李家德,张叶. 采用非局部均值的超分辨率重构[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1576-1585.
- JIA P, LI J D, ZHANG Y. Super-resolution reconstruction using nonlocal means [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1576-1585. (in Chinese)
- [10] 刘妍妍,张新,张建萍. 超分辨重建技术及其研究进展[J]. *中国光学*, 2009, 2(2):102-111.
- LIU Y Y, ZHANG X, ZHANG J P. Super-resolved reconstruction technologies and recent evolution [J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(2):102-111. (in Chinese)

作者简介:



刘晶丹(1988—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,2007年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事计算成像方面的研究。E-mail: superdan1988@126.com

导师简介:



许廷发(1968—),男,黑龙江肇东人,教授,博士生导师,1992年,2000年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电成像探测与识别等方面的研究。E-mail: ciom_xtf1@bit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)