

基于微位移技术提高 CCD 分辨率的方法*

周春大 张 岩**

(首都师范大学物理系,北京 100037)

摘 要 利用微小相对移动和计算机合成技术提高 CCD 等数字图像传感器分辨率是一个行之有效的方法. 本文在这一技术的基础上,将 CCD 图像传感器按像元尺寸和不感光间隔尺寸二者之间的关系做出了分类,提出了适应更多图像传感器类型的高分辨率图像的获取方法和算法,并给出了某些类型的 CCD 图像传感器通过微位移方式提高分辨率的限度. 计算机模拟和实验都验证了这种新方法的可行性.

关键词 图像传感器;CCD;高分辨率;微位移;算法

中图分类号 O434.12 **文献标识码** A

0 引言

在实际的应用中,特别是科研领域,经常需要较高分辨率的图像,所以如何利用现有工艺水平下的 CCD 图像传感器,获得更高的分辨率就成了一个关键的问题. 目前比较行之有效的一种方法是采用被摄物成的像与 CCD 图像传感器之间发生微小相对位移来记录多幅图像或者采用分光并利用多个 CCD 传感器来产生相同的效果,然后利用多次采集的原始图像来合成高分辨率的图像^[1]. 重建高分辨率的方法目前有梯度解析法^[2]、反演解析法^[3]、混合遗传算法^[4]及求解线性方程组的方法^[5]等. 现有的通过位移来提高分辨率的方法都采用了一种将 CCD 的像元看成是彼此间紧密无空隙排列的一系列矩形区域来处理^[1]. 但是受到工艺等的限制,大多数的矩形像元的 CCD 图像传感器在相邻的像元之间会存在一定的不能感光的间隔区域,即占空比小于 100%. 有些 CCD 图像传感器的相邻像元之间不能感光部分的大小已经接近像元本身的尺寸,如仙童公司的 CCD222 在水平方向上的尺寸关系^[6]. 在这种情况下传统算法就会出现以下两个方面的不足:一方面,运用现有微位移方法提高图像分辨率的一些算法来处理图像就存在着一定的偏差,因而会对最终合成出的高分辨图像的真实性和图像质量产生影响. 另一方面,由于像元之间存在不能感光的间隔区域,被采集目标的一部分信息会发生丢失的现象. 本文考虑了矩形像元 CCD 图像传感器的像元尺寸和不感光间隔的尺寸及二者之间的关系,将该关系不同的图像传感器做出分类,并针对不同类型的 CCD 提出了相应的合成高分辨率图像的算法,

同时给出了某些类型的 CCD 图像传感器通过微位移方式来提高分辨率的限度.

1 理论分析及算法描述

假设 r 是微位移器件使面阵 CCD 在成像系统像面上沿水平或竖直方向产生的每一次相对位移的步长,一般要求这个尺寸是微位移器件所能达到准确度的 3~5 倍. 为了降低光的波动性的影响,要求 r 大于照明光的波长 λ ,且大于前方光学系统产生的弥散斑线度 l_0 ,即

$$r > \max(\lambda, l_0) \quad (1)$$

以常见的矩形像元线阵型 CCD 器件为例进行讨论,相应的面阵型 CCD 器件则仅仅增加了一个维度,方法相同.

图 1 给出了 CCD 表面结构的示意图,其中 a 、 b 分别表示 CCD 每个像元感光区域的边长及相邻像元感光区之间部分的宽度,其数值准确度都是设计和制造的指标. 有效像元总数为 m . 对于 a 、 b 间不同关系的 CCD 器件,可以分为以下几种类型讨论.

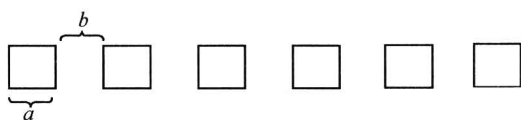


图 1 CCD 表面结构及各部分尺寸
Fig. 1 The structure of the surface of CCD and the size of each part

1.1 类型一

这类 CCD 器件的 a 与 b 值满足如下关系:

在位移器件能达到的准确度和波长限制的范围(式(1))存在一个正实数 c ,使得 a 、 b 除以 c 的结果都是正整数.

对于满足这种尺寸关系的器件,有

$$c \leq \min(a, b) \quad (2)$$

为了获得相应的高分辨率图像,要求相对位移的步长 r 满足

*北京市科技新星计划(2004B35)资助

** Tel:010-68903069 Email:yzhang@cnu.edu.cn

收稿日期:2006-03-29

$$r=c/k \quad (k=1,2,3,\dots) \tag{3}$$

$$\max(\lambda, l_0) < r \leq \min(a, b) \tag{5}$$

则有

$$r \leq c \leq \min(a, b) \tag{4}$$

假设微位移的次数为 p , i_y^p 表示相对移动 p 次后采集的原始图像里第 y 个像元的信号, $c_{y'}$ 表示合成的高分辨率图像中第 y' 个像元的信号, 它们之间的关系为

又由式(1)可知

$$\begin{cases} c_1 + c_2 + \dots + c_{\frac{a}{r}} = i_1^0, c_{\frac{a+b}{r}+1} + c_{\frac{a+b}{r}+2} + \dots + c_{\frac{2a+b}{r}} = i_2^0, \dots, c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+1} + c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+2} + \dots + c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+\frac{a}{r}} = i_m^0 \\ c_2 + c_3 + \dots + c_{\frac{a}{r}+1} = i_1^1, c_{\frac{a+b}{r}+2} + c_{\frac{a+b}{r}+3} + \dots + c_{\frac{2a+b}{r}+1} = i_2^1, \dots, c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+2} + c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+3} + \dots + \\ c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+\frac{a}{r}+1} = i_m^1 \\ \vdots \\ c_{1+p} + c_{2+p} + \dots + c_{\frac{a}{r}+p} = i_1^p, c_{\frac{a+b}{r}+1+p} + c_{\frac{a+b}{r}+2+p} + \dots + c_{\frac{2a+b}{r}+p} = i_2^p, \dots, c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+1+p} + \\ c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+2+p} + \dots + c_{(m-1)\frac{a+b}{r}+\frac{a}{r}+p} = i_m^p \end{cases} \tag{6}$$

式(6)为一个线性的方程组, 其中各个未知量 c 代表合成的高分辨率图像中各个像元的信号. 每一行均为每次微位移后得出的关系, 所以求解该方程组便可以合成出高分辨率的图像. 可以发现当 $p \leq \frac{a+b}{r} - 1$ 时, 通过增加微位移数来增加方程数的同时也增加了等量的未知量, 对求解来说将没有帮助. 所以要求

$$p \leq \frac{a+b}{r} - 1 \tag{7}$$

可以看出方程(7)是 $m(p+1)$ 个线性方程, 待求的高分辨率图像各个像素的灰度值的个数为 $\frac{a+b}{r}m - \frac{b}{r} + p$. 若想仅依靠式(6)求出 $\frac{a+b}{r}m - \frac{b}{r} + p$ 个高分辨率图像像素的灰度值就要求有

$$m(p+1) \geq \frac{a+b}{r}m - \frac{b}{r} + p \tag{8}$$

或

$$mp \geq (\frac{a+b}{r} - 1)m - \frac{b}{r} + p \tag{8'}$$

的关系, p 为自然数. 又因为 $m > 1$ 且 $(\frac{a+b}{r} - 1)m - \frac{b}{r} > 0$, 要想 p 满足式(7)和式(8)则要求

$$p \geq \frac{a}{r} \frac{m}{m-1} + \frac{b}{r} - \frac{m}{m-1} \text{ 或 } p \leq \left[\frac{a}{r} \frac{m}{m-1} + \frac{b}{r} - \frac{m}{m-1}, \frac{a}{r} \frac{m}{m-1} + \frac{b}{r} - \frac{m}{m-1} + 1 \right) \tag{9}$$

但是由式(7) $p \leq \frac{a+b}{r} - 1$, 而在给定的条件下有

$$\frac{a+b}{r} - 1 < \frac{a}{r} \frac{m}{m-1} + \frac{b}{r} - \frac{m}{m-1} \tag{10}$$

明显出现了 p 无解的情况, 即无论经过多少次的移动与采集也不能够合成出相应的高分辨率图像. 所以必须要增加一定的条件. 在实验中可以采用增加边界条件的方式. 一种方法是将 CCD 器件的部分像元的边缘用适当的材料进行遮挡, 使得这部分的光强为已知的值, 比如零, 如图 2. 这个已知的值可以预先通过相同 CCD 光学系统采集大面积的该种材料而得到. 这种方法适用于拍摄物体难以接近, 而且 CCD 表面容易接近的成像系统. 另一种是在

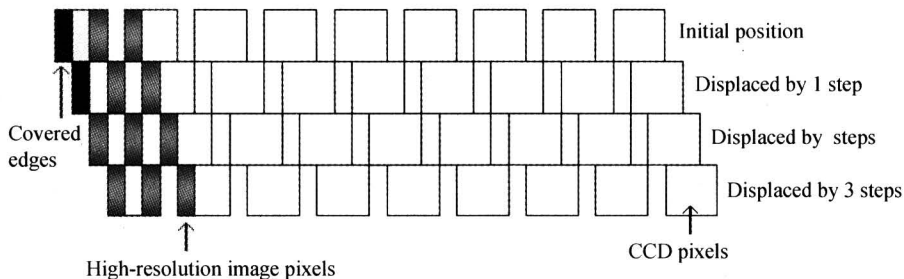


图 2 多次微位移采集的图像各像元信号与待合成的高分辨率图像各像元信号间关系图
Fig. 2 Illustration of the relationship between pixel signals gathered by multi-displacing CCD and signals of the high-resolution image

被摄物的边缘增加颜色和亮度都完全均匀且面积足够大以致其成的像完全覆盖一个像元的均一材料, 该方法适用于受 CCD 表面结构限制而不能接近其表面的成像系统. 为计算简便, 此处使用不透光

的直边蒙版将 CCD 边缘的一排或列像素边缘 r 宽度的范围进行遮挡, 并通过移动 CCD 相同的驱动器对该蒙版进行移动和控制. 这样使得未知数的个数减少, 而同时不减少方程的个数. 设遮挡边界而

减少的未知数的个数为 e , 又由于实际的原因, 要求

$$e \leq p + 1 \tag{11}$$

即

$$p \geq \frac{(a+b)m - b - er - mr}{r(m-1)} \tag{12}$$

满足式(7) $p \leq \frac{a+b}{r} - 1$, 即

$$\frac{(a+b)m - b - er - mr}{r(m-1)} \leq p \leq \frac{a+b}{r} - 1 \tag{13}$$

由于遮挡边界从而减少的未知数个数受到微位移次数的限制, 所以采取优先提高微位移次数, 然后增加遮挡边界的方法来解决. 即取 p 最大, e 最小, 则此时

$$\frac{(a+b)m - b - er - mr}{r(m-1)} = p = \frac{a+b}{r} - 1 \tag{14}$$

即

$$e = \frac{a}{r} - 1 \tag{15}$$

并满足式(11). 所以, 对于该线阵型 CCD 器件及确定的 k 值, 最终通过该微位移方法提高分辨率的最大倍数理论上为

$$F = \frac{a+b}{r} - \frac{b}{rm} = k \left(\frac{a+b}{c} - \frac{b}{cm} \right) \tag{16}$$

同理, 对于相应的面阵 CCD 及确定的 k 值, 通过该微位移方法在水平或垂直方向上提高到分辨率的最大倍数理论上也是该值.

特殊地, 对于一部分 CCD 器件, 其本身 $b=0$, 或者 CCD 表面有紧密排列的微透镜而等效为 $b=0$. 这种情况, 只要求 c 能被 a 整除, 有 $c \leq a$, 其中 r 仍满足式(3) $r = \frac{c}{k}$, 其中 $(k=1, 2, 3, \dots)$, 则有 $r \leq c$.

又由式(1), 所以要求 r 满足

$$\max(\lambda, l_0) < r \leq a \tag{17}$$

可见在这种特殊的情况下, 想应用此方法来获得高分辨率, 对 r 的要求比通常情况要宽松, 即微位移器件无须达到通常情况要求的准确度. 严格地说以往的文献[2-12]考虑和解决的都是此类问题, 并非适用于所有的情况.

1.2 类型二

这类 CCD 器件不满足类型一的条件, 即 a 与 b 在位移器件能达到的准确度和式(1)限制的范围内不存在一个正实数 c , 使得 a, b 除以 c 的结果都是正整数. 在这用情况下, 想要通过微位移的方法较高准确度地提高分辨率就存在着一定的困难. 因此, 若不改变微位移的方法则只能得到分辨率提高而画质相对降低的图像. 并且, 随着微位移的次数的增多, 这种不独立性的影响将变大.

为了降低误差和画质的损失, 可以修改本文算

法, 将多次移动后产生的空间误差降到最低. 令 1.1 中的 c 满足 $M = \text{mod}(a, c) + \text{mod}(b, c)$ 取极小值, $\text{mod}()$ 表示求余函数. 在这种情况下, 对于该线阵型 CCD, 通过该微位移方法提高分辨率的最大倍数不会超过式(16).

2 模拟实验测试

用计算机模拟一个像素数为 100×100 的 CCD 器件, 其像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 每个像元之间不能感光部分的距离为 $10 \mu\text{m}$. 用一幅 800×800 像素的图像做为被摄物, 且成像恰好完全覆盖 CCD 感光区域. 根据本文的算法, 可以将微位移的步长选择为 $10 \mu\text{m}$, 则其在各个方向上的分辨率可提高到 CCD 器件本身分辨率的 4 倍, 即 400×400 的水平. 同时也模拟用 400×400 像素的 CCD 器件一次直接采集的图像与合成出的图像进行对比.

原始图像为 800×800 像素的一系列不同宽度黑白条纹, 如图 3(a), 每组条纹长都是 50 个像素, 黑白条纹的宽度按列从 16 个像素递减到 2 个像素, 图 3(b) 给出了原始图像的局部放大, 条纹的宽度为 6 个像素. 首先模拟将 100×100 像素 CCD 器件在水平和垂直方向分别移动过 3 次, 再分别进行两次遮挡, 采集出 25 幅图像, 然后将其进行合成得出高

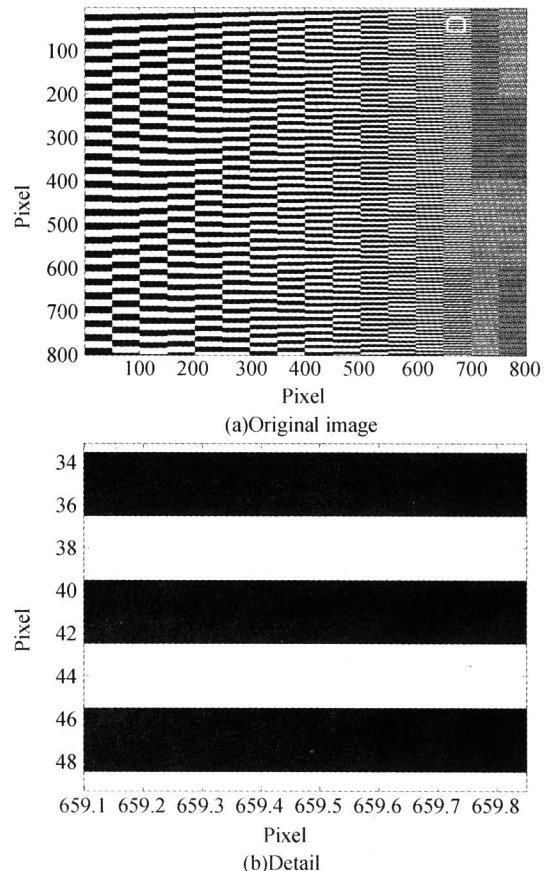


图 3 原始图像和它的局部
Fig. 3 Original image and its detail

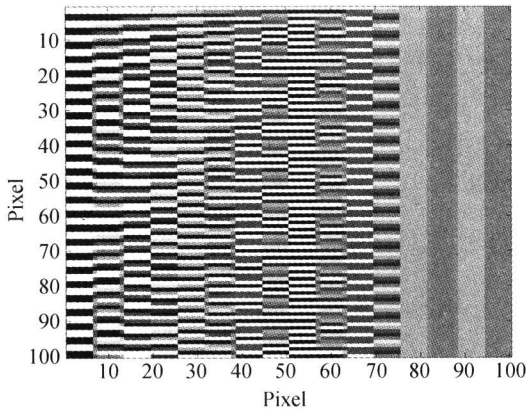


图4 使用 100×100 像素的 CCD 一次采集所得的图像
 Fig.4 The image collected by 100×100 pixels CCD

分辨率的图像. 图4给出了利用 100×100 像素的 CCD 直接采集图像的效果. 由于分辨率的限制, 图中右数第八组条纹仍然能分辨出, 但从右数第七组条纹起条纹的空间周期就不能再分辨了.

图5给出了合成的图像和它的局部放大. 从图中可以明显看出来, 对右数第三组条纹, 原始图像中每对黑白线为6个像素, 即每个周期为6个像素, 重新合成出的图像中每个周期仍是3个像素, 并且出现了一个灰度条纹带. 这是由于合成出的图像在一个方向上覆盖了原始图像的两个像素, 而其中的灰色条纹恰为原始图像中两个明暗条纹被 CCD 的

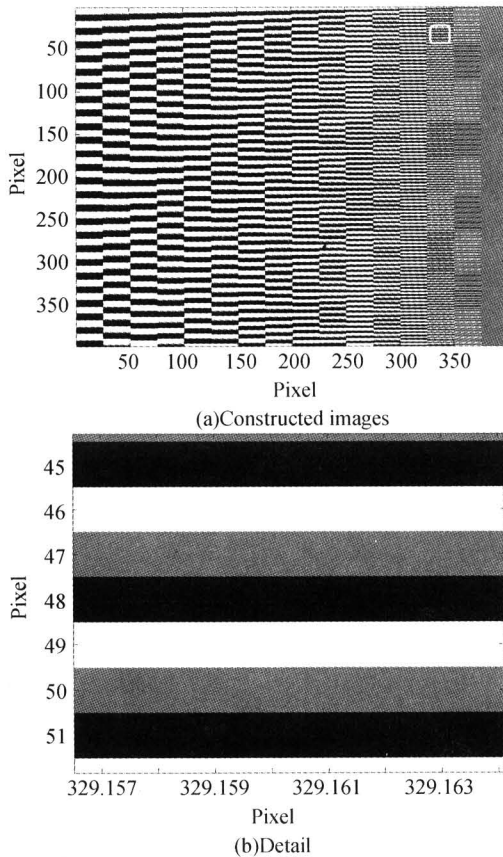


图5 多次采集后合成的图像及其局部放大
 Fig.5 Image constructed through multi-collected images and its detail

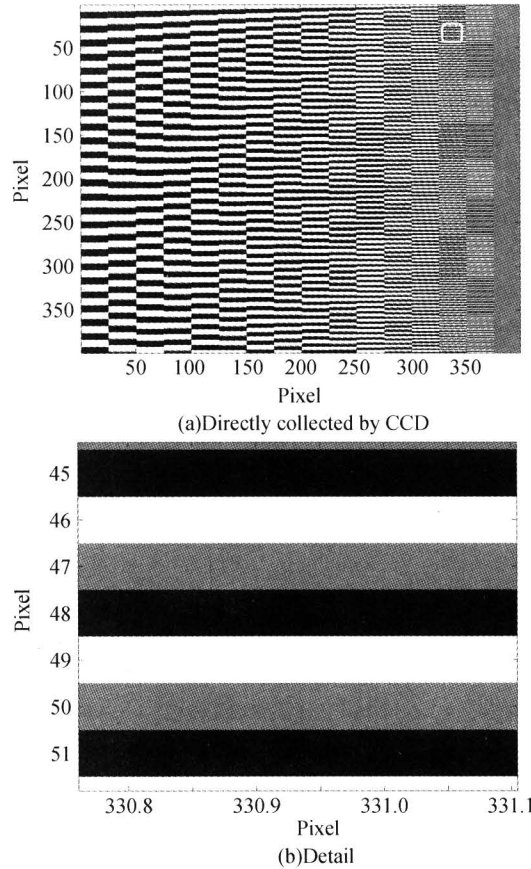


图6 采用 400×400 分辨率的 CCD 直接采集的图像及其局部放大

Fig.6 The image directly collected by 400×400 pixels CCD and its detail

同一个像元采集所致, 更细的两组条纹已经无法分辨. 图6给出了利用 400×400 像素的 CCD 器件直接采集得到的图像. 将合成的高分辨率图像与模拟 400×400 像素的 CCD 器件直接采集出的图像对比发现: 二者完全相同, 即该算法方法能够真实模拟出相应分辨率 CCD 器件的效果.

对 1.2 类型的 CCD 器件, 只能取得质量受到影响的高分辨率图像. 就某个具体的 CCD 来说, 高分辨率图像质量的损失主要与 M 的值有关, M 越小合成图像质量的损失越小. 即这种误差的大小依赖于 c 值的选取. 而且在这种情况下高分辨率图像各个像素的误差并不相同, 有时为了降低误差而选取的 c 值可能将分辨率提高到了超过需要的倍数, 这时可以将重构出的高分辨率图像进行逆向操作. 即将高分辨率图像像素融合取平均, 以获得需要的分辨率下各个像素误差分布均匀的最终图像.

3 实验结果

实验通过电控平移台来移动被测物并通过光学镜头在线阵 CCD 图像传感器上成像最后利用计算机按上述方法来合成高分辨率的图像.

实验中采用的成像设备是普通教学用 CCD 实验

仪. 该实验仪搭载的线阵 CCD 为东芝 TCD2252D, 其矩形像元边长为 $8\ \mu\text{m}$, 像元间距为 $8\ \mu\text{m}$. 实验仪的光学系统垂轴放大率为 0.4. 因此该 CCD 对物方的原始分辨率相当于 $20\ \mu\text{m}$. 微位移驱动装置使用了 ZolixKSA111-200-S4N 蜗杆传动的电控平移台, 其平移的精确度可以达到 $10\ \mu\text{m}$ 以上.

根据式(14)、(15)、(16)有 $p=1, e=1, F=2$, 即

表 1 实验中 USAF1951 标准分辨率测试样板中 6 组条纹的间距

序号	1	2	3	4	5	6
宽度/ μm	15.625	13.88888889	12.40694789	11.03752758	9.842519685	8.771929825

上应该能至少分辨出第 4 组条纹的空间周期.

利用 CCD 直接测量得到的结果如图 7(a), 可以看出使用 CCD 直接测量得不到任何条纹空间周期. 利用平移台将物体垂直光轴方向移动 $10\ \mu\text{m}$ 后, 可以获得第二幅图像. 采用这两幅图像合成的结果如图 7(b), 可以看出: 该算法合成的图像可以分辨出第 4 组条纹的空间周期, 与原始样板图案吻合很好, 甚至第 5 组条纹的空间关系也能在一定程度上分辨出来, 但更细的第 6 组条纹已经无法分辨了, 这与理论推测也十分吻合. 为了利用 CCD 的线性区, 在拍摄过程中使图像的信号尽量落在 CCD 传感器的线性区所以背景也比较明亮, 可以看到 100 左右的背景信号. 图 7(c) 给出了理想图像的信号分布, 可以看出除了背景信号外, 图 7(b) 很好地反

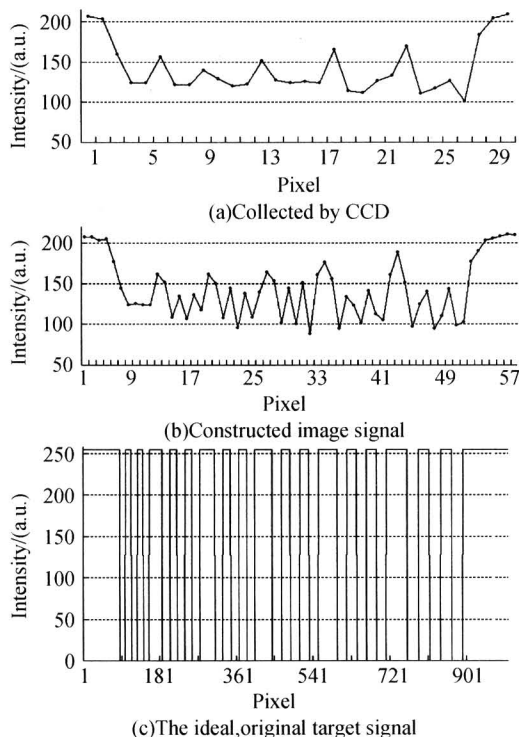


图 7 直接采集的图像信号、合成的图像的信号与理想情况下的原始样板信号的对比
Fig. 7 Comparison among the image signal collected by CCD, the constructed image signal and the ideal, original target signal

通过一次额外的移动和采集以及增加一次边界条件, 通过该算法可以使分辨率增大到原来的 2 倍, 即理论上能分辨出 $10\ \mu\text{m}$ 的细节. 被成像的样品为 USAF1951 标准分辨率测试样板, 所采集的 6 组样板条纹宽度及每组三个条纹的间距如表 1. 因为条纹的最大间距大于 $20\ \mu\text{m}$, 利用 CCD 直接测量是分辨不出样板的任何一组条纹的, 而利用该算法理论

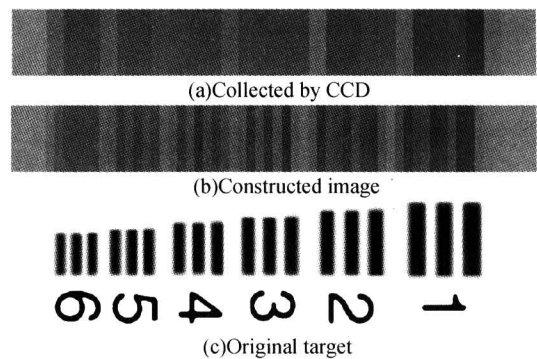


图 8 直接采集的图像、合成的图像与原始样板图形之间的对比

Fig. 8 Comparison among the image collected by CCD, the constructed image and the pattern of the original target

映了原图像. 图 8 给出了各个信号拓宽之后绘制出的图像, 由于背景信号的影响, 图 8(a) 和 8(b) 的对比度较差, 但是仍能看出利用该算法重建的图像(图 8(b))具有更好的分辨率.

4 结论与展望

本文在微小相对移动及计算机合成这一技术的基础上, 将矩形像元的图像传感器按照像元尺寸和不感光间隔尺寸二者之间的关系做出了分类, 提出了适应更多图像传感器类型的获取高分辨率图像的实现方法. 通过理论推导, 得出了某些类型的图像传感器通过多次移动方式提高分辨率的限度. 模拟实验显示出在考虑到 CCD 器件像元之间有不感光的间隔时, 分别应用不同算法确实能获得真实意义上的分辨率提高. 实际测量的结果也证明了该算法的可行性.

该方法的缺点是对 CCD 像元的完好率要求较高. 若是 CCD 器件本身的有效像元中出现不良的像元, 则它会对合成出的一系列像素产生失真的影响. 同时该方法会由于边界遮挡和前方的光学系统产生的衍射而使得最终合成出的高分辨率图像出现误差. CCD 图像传感器固有的误差在提高分辨率的过程中可能被积累而放大, 这也是应用该方法提高

分辨率的一个限制. 此外, 应适当改进 CCD 的生产工艺技术, 使 CCD 满足类型一, 尤其是其中特殊类型的条件, 这样不仅能提高 CCD 器件本身的性能指标, 更能提高该 CCD 在微位移成像技术方面应用的表现. 本方法也适用于与 CCD 图像传感器类似的 CMOS 等图像传感器.

致谢: 感谢天津大学王庆有教授的知识传授和问题的解答, 感谢首都师范大学物理系冯立春讲师提供的仪器设备和给予的指导. 感谢首都师范大学 THz 实验室及红外热波实验室工作人员的配合.

参考文献

- 1 Tsai R Y, Huang T S. Multiframe image resolution and registration. *Advances in Computer Vision and Image Processing*, 1984, **1**(1): 317~319
- 2 刘义鹏, 冯华君, 徐之海, 等. CCD 高分辨成像的梯度解析法. *光电工程*, 2005, **32**(7): 78~81
Liu Y P, Feng H J, Xu Z H, et al. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(7): 78~81
- 3 王凌, 冯华君, 徐之海, 等. 反演解析法提高 CCD 成像分辨率的噪声影响研究. *计量学报*, 2004, **25**(1): 19~22
Wang L, Feng H J, Xu Z H, et al. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(1): 19~22
- 4 刘梅, 刘伟东, 姜义成, 等. 一种基于混合遗传算法的超分辨图像重构方法. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, **36**(6): 749~751
Liu M, Liu W D, Jiang Y C, et al. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, **36**(6): 749~751
- 5 卓宁, 孙华燕, 张海江. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法. *光学学报*, 2005, **25**(6): 777~780
Zhuo N, Sun H Y, Zhang H J. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 777~780
- 6 徐秀平, 李柱峰. 基于 CCD 检测微机控制的光干涉微位移自动化测量新方法. *五邑大学学报(自然科学版)*, 2002, **16**(4): 44~47
Xu X P, Li Z F. *Journal of Wuyi University (Natural Science Edition)*, 2002, **16**(4): 44~47
- 7 王庆有. 图像传感器应用技术. 北京: 电子工业出版社, 2003 年
Wang Q Y. *Application of image sensor technology*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
- 8 江孝国, 祁双喜, 王婉丽, 等. 光纤耦合 CCD 相机的平场校正方法研究. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1239~1242
Jiang X G, Qi S X, Wang W L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1239~1242
- 9 苏秀琴, 王飞, 刘文. 一种提高 CCD 目标测量数据处理速度的新方法. *光子学报*, 2001, **30**(7): 864~867
Su X Q, Wang F, Liu W. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 864~867
- 10 陈荣利, 张禹康, 樊学武, 等. 空间高分辨率 CCD 相机次镜支架最佳结构设计. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1251~1254
Chen R L, Zhang Y K, Fan X W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1251~1254
- 11 胡炳梁, 马彩文, 孙益善, 等. CCD 自动调光设计. *光子学报*, 2002, **31**(4): 504~506
Hu B L, Ma C W, Sun Y S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 504~506
- 12 刘文, 苏秀琴, 王飞. CCD 测量系统实现及其实时性讨论. *光子学报*, 2002, **31**(6): 774~777
Liu W, Su X Q, Wang F. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 774~777

Resolution Improvement with CCD Micro-Displacement

Zhou Chunda, Zhang Yan

Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037

Received date: 2006-03-29

Abstract It is an effective approach to improve CCD imaging resolution by micro-displacing CCD and reconstructing image in a computer. Based on this method, an assortment was proposed to differentiate CCDs by the relationship between pixel size and light-insensitive interval size. If the intervals are neglected, as usual, the quality of the reconstructed high-resolution image using the micro-displacing technology will be reduced, and some information of the original object might be lost. An algorithm which is available for more sorts of CCD is proposed to reconstruct high-resolution image, and the limitation of this approach is also educed. The simulation and experiment result show that the quality of the reconstructed image can be effectively improved.

Keywords Image sensor; CCD; High-resolution; Micro-displacement; Algorithm



Zhou Chunda was born in 1984, and in Liaoning Province. As a junior of the Department of Physics, Capital Normal University, he performs perfectly both in study and research. He has won the first class scholarship two years in a row, and has been rewarded with the honor of Beijing Excellent Student. In his school's undergraduate research programs, he has been engaged in the study on this.