

doi:10.3788/gzxb20174603.0311001

基于普通 CCD 的每秒百万帧高帧频成像方法

杨少华¹, 李斌康¹, 罗通顶², 郭明安², 刘璐², 严明², 高帅²

(1 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要:针对 CCD 图像输出时间长影响其帧频率的问题,提出了一种基于普通 CCD 实现超高帧频成像的方法.采用掩膜覆盖 CCD 的光敏区,建立图像的片上存储空间,消除 CCD 电荷转移输出占用过多时间的影响,可以使普通 CCD 的帧频达到每秒百万帧频以上.介绍了不同掩膜实现方案的优缺点,讨论了掩膜图像的恢复方法,采用条状孔掩膜方式建立了基于普通 CCD 的每秒百万帧高帧频成像系统样机,利用氙灯对样机性能进行验证,获得了 14 幅 79×79 像素的氙灯发光过程图像,样机帧频率达到了每秒 200 万帧的超高速速度.

关键词:百万帧每秒成像系统;高帧频 CCD;在芯片存储图像传感器;CCD;掩膜

中图分类号: TN386.5; P231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)03-0311001-10

Million Frames per Second Imaging Method Based on Normal CCD Sensor

YANG Shao-hua¹, LI Bin-kang¹, LUO Tong-ding², GUO Ming-an²,
LIU Lu², YAN Ming², GAO Shuai²

(1 State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China)

(2 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: An ultra-high speed imaging method based on normal CCD sensor was proposed. The light sensitive area of the chip was covered by the mask and turned into storage area. The influence of extra time that CCD charge transfer took was eliminated. So the frame rate of masked CCD could achieve million frames per second. The different types of masks were introduced, and the restoration method of masked images was discussed. The method of strip-hole array mask was used to build the ultra-high speed imaging prototype base on normal CCD, and the performance was verified by xenon lamp. After the location of mask pixel center and mask direction are both known, the masked images is finally separated and reformed into several low resolution result images. Results show that a performance of 2 million frames per second is achieved and 14 images with a resolution of 79 pixel×79 pixel are got.

Key words: Million frames per second imaging system; High frame rate CCD; On-chip storage imaging sensor; CCD; Mask

OCIS Codes: 110.2970; 110.3010; 040.1520; 100.2000; 320.7085

0 引言

高帧频成像系统能够诊断高速运动对象的精细运动行为,把快速运动的过程“冻结”在微小的瞬间,把瞬态变化的过程分割成若干个小的时间片,从而获得一些有价值的信息,在流体力学、高速碰撞试验、等离子体物理、爆炸力学、超声流场气动力学等科研领域中有广泛应用^[1].高帧频成像系统由图像传感器、驱动与视频处理电路、数据传输与采集电路以及图像采集控制软件等系统组成.其中图像传感器是获取高速目标图像的

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11475138, 11075131)资助

第一作者:杨少华(1981-),男,研究员,博士,主要研究方向为特种成像系统研制、辐射图像探测、核电子学等. Email: yangshaohua@nint.ac.cn

收稿日期:2016-06-22; **录用日期:**2016-12-08

<http://www.photon.ac.cn>

关键部分. 作为常用的图像传感器, CCD 具有灵敏度高、动态范围大等优点, 按像元排列方式分为线阵 CCD 和面阵 CCD 两类, 对于面阵 CCD 器件, 由于 CCD 的像素需要通过电荷转移逐个输出, 其像素输出速率无法满足甚高帧频的要求, 在超过十万像素的分辨率下, 其帧频率很难达到每秒万帧以上, 限制了 CCD 在超高速成像领域的应用. 为了提高 CCD 的帧频率, 从 CCD 的硬件单元架构外围驱动方式和工作模式方面提出了一些新的构想. 在 CCD 硬件单元架构方面, 多端口输出技术^[2]被提出, 多端口 CCD 在电荷的输出部分采用多个水平转移寄存器结构, 每个水平转移寄存器结构对应一个输出放大器, 从而实现一个水平像素转移周期内可以同时输出多个像元的电荷, 与采用单个端口输出的方式相比, 可以成倍地提高 CCD 的帧频率. 多端口输出方式可以把 CCD 的帧频提高到每秒几百帧甚至每秒千帧的速度, 但仍然无法完全克服像素电荷输出时间对帧频率的限制^[3-4]. 在外围驱动方式和工作模式方面, 通过外部驱动改变图像获取的方式, 减少或避免图像输出过程对帧频的影响, 达到提高帧频的效果. 这些技术有 Binning 技术^[5-7]、窗口读出 (Region of Interest, ROI) 技术、异步时序驱动方法^[8]、双曝光技术^[9]、异步抽样驱动技术^[10]、计算成像技术^[11-13]等. 此类技术不需要更改 CCD 的硬件, 而是通过改变驱动逻辑再配合一定的图像处理即可实现, 应用十分方便. 其中双曝光技术与异步抽样驱动技术可以实现微秒级间隔图像的获取, 可以获取 2~3 幅图像, 其余的技术方法仍然无法实现每秒百万帧的工作速度. 为了进一步提高 CCD 的帧频率, 芯片存储 (In-situ Storage Image Sensors, ISIS) 技术被提出并应用, 每个像素在芯片上都对应一个存储区, 这样 CCD 芯片摆脱了电荷输出时间的影响, 以序列模式工作时等效帧频率也达到了每秒百万帧以上的工作速度^[14-15]. 同样的技术也被应用在 CMOS 图像传感器中, 并达到了每秒 500 万帧的超高帧频^[16]. 本文提出了一种基于普通面阵 CCD 芯片二次掩膜的方式实现图像片上存储功能的方法, 通过特殊驱动电路和图像处理软件的设计, 获得了序列模式下等效帧频率达每秒 200 万帧的成像性能.

1 每秒百万帧掩膜式 CCD 设计原理

1.1 掩膜式 CCD 原理

采用掩膜把普通 CCD 的光敏区进行部分覆盖, 使其变成图像电荷存储区, 这样原本的普通 CCD 芯片就具有了片上存储功能, 从而实现片上存储多幅图像数据, 使 CCD 摆脱图像输出过程影响, 帧频率将有可能提高到每秒百万帧的速度. 基于这一原理, 本文提出了一种基于掩膜的 CCD 设计方案, 在普通面阵 CCD 的感光区采用每隔 1 行掩膜 n 行的方式, 把感光区重新划分为数个具有存储区域的感光像元行阵列, 实现图像电荷包的就近存储, 使普通 CCD 的帧频率 (F_r) 达到 ISIS-CCD 的速度, 如图 1 所示. 对于分辨率为 $M \times N$ 像素有效感光像元阵列的 CCD 来说, 每隔 1 行掩膜 n 行, 感光区重新划分成 m 个区域, 其中 $m = M / (n + 1)$, 构成能够存储 $n + 1$ 幅图像 (分辨率为 $m \times N$) 的超高速 ISIS-CCD 芯片. 此时, 覆盖的 n 行作为存储区, 存储前面 n 个曝光时间的图像数据, 未掩膜的 1 行存储当前曝光的图像数据. n 的最优值根据实际应用需求选择. 因为所能获得的最大画幅数与 n 值成正比为 $n + 1$, 分辨率与 m 值成正比为 $m \times N$, n 值越大, 存储画幅数越多, 分辨率越低.

在这种情况下, CCD 的最高帧频率 F_r 由曝光时间 t_{exp} 与一行电荷的转移时间 V_t 共同决定, 即

$$F_r = \frac{1}{t_{\text{exp}} + V_t} \quad (1)$$

由 CCD 像元的基本原理可知, CCD 的感光区像元在转移时也在曝光, 因此掩膜后 CCD 的 t_{exp} 可以为 0, F_r 的值仅与行转移时间相关, 为 $1/V_t$. 即当 CCD 行转移时钟频率最高为 1 MHz 时, 掩膜后的 CCD 的最高帧频率可以达到每秒 1 百万帧.

1.2 掩膜设计方式

掩膜是普通 CCD 实现每秒百万帧高速成像的关键部件, 决定着最终的成像效果和成像系统的性能. 掩

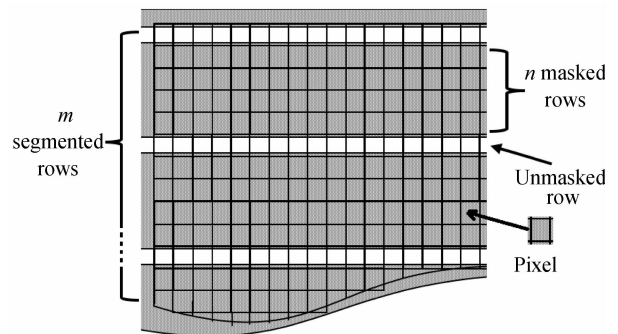


图 1 掩膜 CCD 感光区结构原理示意图

Fig. 1 Structure diagram of masked CCD's photosensitive area

膜的性能主要由掩膜的材料、掩膜耦合方式、掩膜设计方式(透光孔大小、间距、空间排布)等因素共同决定。掩膜材料的透光率对存储像元的影响较大,透过掩膜的光都属于噪声光,影响掩膜 CCD 的动态范围和灵敏度,透光率越低的掩膜材料越好。掩膜的耦合方式可以分为直接耦合与间接耦合,直接耦合是在 CCD 的光敏区直接镀膜(覆盖掩膜),定位准确度高,效果好,但工艺上需要未封装的 CCD 晶圆进行加工,实现难度很大;间接耦合是先通过光纤面板与 CCD 耦合再把掩膜覆盖在光纤面板上,实现工艺简单,但由于光纤面板是多根光纤压合而成,会对前端掩膜图像离散化,对透光孔的光线增加一级点扩散函数,造成传输图像的退化,很难实现透光孔与感光像元之间的像素级对应。这种方式只适合进行原理级的实验验证和图像要求不高的非定量计算场合应用,要获得高性能的掩膜 CCD 还是需要采用直接掩膜的方式。掩膜的设计方式决定了系统的分辨率与存储画幅数,除了上述的隔一行掩膜 n 行的栅形掩膜设计方式以外,还有条状孔掩膜、点状孔阵列掩膜以及非规则孔掩膜几种不同方式。栅形掩膜把垂直空间分辨率降低为原 CCD 的 $1/(n+1)$,水平空间采样率不变,所采集为栅形图像。这种方式存储画幅数为 n 或 $n+1$ 幅图像,水平采样率为垂直采样率的 $n+1$ 倍,其水平与垂直方向的采样效率差别较大,为非对称空间采样。如果想要得到水平与垂直具有相同的空间采样率的图像,则需要把栅形掩膜水平方向的像素进行复合处理,每 $n+1$ 个像素复合成一个像素,所得图像分辨率为 $[M/(n+1)] \times [N/(n+1)]$ 像素(原图像分辨率为 $M \times N$ 像素)。

为改善图像垂直空间采样率与水平空间采样率之间的非对称关系,采用条状孔式的掩膜采样方式,结构如图 2 所示。垂直方向两个相邻开孔行之间的距离为 n 个像元,水平方向把栅形掩膜的整行开孔方式变成每隔 n 像元等间隔开孔的方式,开孔大小为宽度小于一个像元,长度小于 $n/2$ 像元的方形孔。相邻行的开孔在垂直方向采取交错排列的方式,因此垂直方向的透光孔之间有 $2n-1$ 个像元被遮挡,这些被遮挡的像元都可以作为存储区使用。因此,条状孔式的掩膜可以获得两倍于栅形掩膜的存储空间。

条状孔掩膜把 CCD 水平方向的像元也进行了二次采样,以牺牲水平方向的冗余分辨率的方式换取了一倍的存储空间。但是在水平方向,仍然存在透光像元多于一个的情况,因此水平方向的像元与分辨仍然存在冗余,还有优化的空间。

为进一步提高 CCD 感光区的利用效率,在相同垂直分辨率条件下存储更多帧图像数据,采用点状孔阵列式的掩膜采样方式。图 3 是一个 3×3 的点状孔阵列。图中黑色线的方格代表一个感光像元,不同灰度的区域表示点状孔的“基元”,每个点状孔基元由 3×3 感光像元阵列构成。每个基元选取中间的一个像元(图中标示字母的方格, a_1 、 b_1 、 c_1 等)为“代表像素”,在该位置开直径小于像元尺寸的圆孔,用于透光以收集电荷,其余的感光像元则完全遮挡,用于存储。每 9 个基元组成一个 3×3 的基元阵列,基元采用步进错位方式排列组成基元阵列,而后以拼接方式把基元阵列布满整个掩膜区域,获得点状孔阵列掩膜。由图 3 可以看出,两个开孔位置对应的感光像元在垂直方向间距为 9 个像素,它们之间的 8 个感光像元被遮挡用作存储单元,因此, 3×3 点状孔阵列可以存储 9 幅图像。在垂直方向,每两行曝光像元(如 a 行与 b 行)之间的间距为 3 个像素,对应于栅形掩膜与条状孔掩膜的行间距是 3,采用栅形掩膜可存储 3 幅图像,条状孔可以存储 6 幅图像,而点状孔则可以存储 9

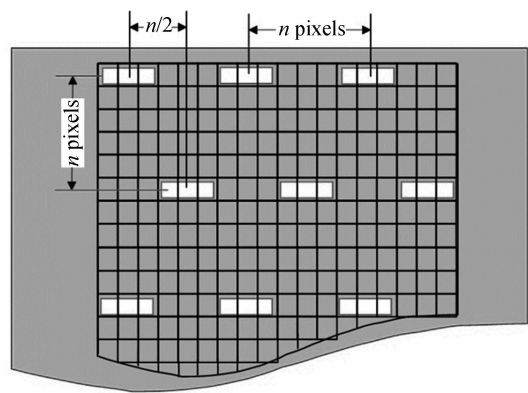


图 2 条状孔阵列掩膜原理示意图
Fig. 2 Principle diagram of stripe-hole-array mask

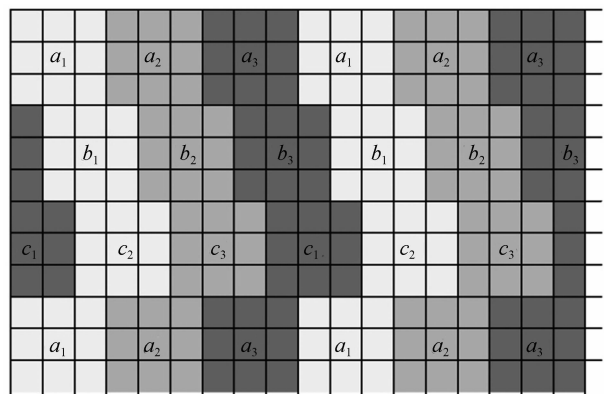


图 3 点状孔阵列式掩膜原理示意图(3×3 矩阵)
Fig. 3 Principle diagram of stripe-hole-array mask (3×3 matrix)

幅图像. 因为采用阵列式的设计, 使得每个像元都得到了充分利用, 即不曝光像元都是有效的存储单元, 使 CCD 的感光区的像元得到了完全的利用.

图 3 是 3×3 的点阵孔阵列掩膜的原理, 该方法可以扩展到 $n \times n$ 阵列的掩膜加工. 对于 $n \times n$ 的阵列, 它的基元由 n^2 个像元组成, 开孔位置可以选择中心点或者某个角点, 再把基元以错位方式排列成 $n \times n$ 的基元阵列, 构成点状孔阵列的基本结构, 最后把基元阵列布满整个掩膜区域. $n \times n$ 的点状孔阵列可以存储 n^2 幅图像, 图像的分辨率在水平与垂直方向降低为原图像的 $1/n$.

三种不同的掩膜方式都是对 CCD 的感光区进行二次采样的过程, 因为开孔方式的区别, 采样效率有很大的差别. 栅状掩膜的空间利用率低, 图像恢复算法方便, 易于实现. 条状孔阵列可以得到两倍于栅状掩膜的存储空间, 但图像恢复算法复杂, 需要较精确的定位才能获得较高质量图像, 属于点状孔阵列的一个特殊变体. 点阵孔式可以得到三倍于栅状掩膜的存储空间, 像素分辨率高, 但图像恢复算法最为复杂, 对精确定位的要求很高, 需要高准确度控制的平台才能获得较高质量的图像. 三种掩膜方案的对比参见表 1.

表 1 三种掩膜方案对比 (间隔 $n-1$ 行曝光一行)

Table 1 Comparison among three masks (exposure one row at $n-1$ row intervals)

	Resolution (initial is $M \times N$)	Frame number	Realization difficulty
Grid mask	$M \times N/n$	n	Simple for machining and algorithm, low for location accuracy
Stripe-hole array	$2M/n \times 2N/n$	$2n$	Complex for machining and algorithm, high for location accuracy
Dot-hole array	$3M/n \times 3N/n$	$3n$	Most complex for machining and algorithm, highest for location accuracy

1.3 掩膜 CCD 驱动方法

对于感光区改变后的掩膜 CCD, 要实现超高帧频的效果, 需要设计特殊的掩膜驱动时序, 本文仅针对面阵 CCD 进行分析讨论. 面阵 CCD 一般分为全帧转移 (Full Frame CCD, FFCCD)、帧转移 (Frame Transfer CCD, FTCCD)、行间帧转移 (Interline Transfer CCD, ITCCD) 等几种. 对于 ITCCD, 由于电荷需要从光敏像元转移到行间存储区, 增加了一级传输时间, 其最高等效帧频有所降低, 因此本文仅选择 FFCCD 与 FTCCD 进行实验验证, ITCCD 的时序本文不作讨论. 下面就 FFCCD、FTCCD 掩膜后的驱动时序进行讨论.

FFCCD 与 FTCCD 的光敏区具有类似的结构, 掩膜后的驱动方式基本相同. 正常的一帧工作时序可以分为曝光与输出两个过程. 掩膜式 CCD 设计仅更改了感光区的结构, 因此在时序设计时, 输出时序与原 CCD 时序相同, 不同的是曝光过程的控制时序, 即对感光区的控制时序需要重新设计. 采用掩膜后, 原来的曝光过程变为多个小的超高速帧过程 (过程 1) 序列, 这些超高速帧过程序列包括可调曝光与快转移两个过程, 而输出过程则与掩膜前的 CCD 时序相同, 如图 4 所示. 快转移过程是指转移一帧掩膜图像的过程, 实际上仅需转移一个感光区的像素行, 在时序上是一组 V 脉冲. 因此, 超高速帧过程实际上是一个增加了一段延迟时间的垂直转移 V 时钟脉冲的周期序列.

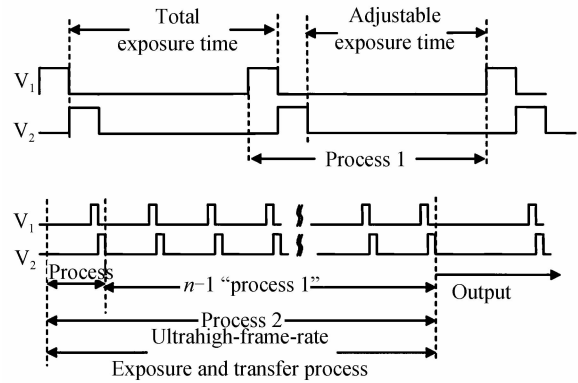


图 4 二相掩膜 CCD 的超高速驱动时序图

Fig. 4 Ultrahigh-speed timing of two-phase masked CCD

本文选择 FFCCD 和 FTCCD 进行掩膜 CCD 的验证, 这两种类型的 CCD 自身没有电子快门, 从图 4 的掩膜 CCD 驱动时序可以看出, 在超高帧频图像采集过程的前后时间内, 透光孔对应的感光像元都处于曝光状态, 如果此时有光线入射到 CCD 的感光面, 必然会引入额外的光生电荷, 这些额外的电荷对于掩膜 CCD 来说属于噪声, 会影响最终恢复的图像. 而从 CCD 原理上来说, 图像输出所占用的时间很长, 即便是 FTCCD 由感光区转移到存储区的时间 ($N \times V_i$) 相对来讲也很长, 所以这种额外曝光所引起的噪声对于有效曝光来说是巨大的, 需要设法消除. 这也为采用 FFCCD 与 FTCCD 的掩膜 CCD 提出了实际应用的条件, 即需要同步的脉冲光源或者是额外的光学快门.

2 图像复原算法

2.1 掩膜图像分析

图像被掩膜分割成若干个小的图像块,并丢失了许多空间信息.因此,掩膜的方法是利用空间信息的损失换取时间分辨的提高,损失的空间信息越多,获取的时间分辨图像数量越多.由于各个小的图像块之间不具有空间的连续性,因此很难通过计算获得全部的空间信息,这意味着图像空间分辨能力的下降.掩膜后的图像经离散化后形成的小图像块在 CCD 光敏面被分解成像素点,图像块的大小决定了分解的像素点的多少,为方便图像的计算恢复,分解的像素点越少越好,因此期望小图像块被离散成一个像素点.那么此时图像的复原也变得相对简单,把各个有效像素点的位置进行重新排列即可恢复出所要的图像数据,也就是图像的所见即所得.

本文采取先进行 CCD 光纤面板耦合,而后在光纤面板表面覆盖金属掩膜或镀膜的方式,实现掩膜式 CCD 的原理验证.具体实施时无法达到单像素的定位准确度,因为光纤的芯径是 $6\ \mu\text{m}$,要把每个小图像块都置于单一的光纤芯径内要求极高的定位准确度;如果水平方向被分解为 80 个图像块,每个图像块的大小为 $2\ \mu\text{m}$,要把 80 个图像块都置于单一的光纤芯径内,那么掩膜孔的定位准确度需要达到 $(6-2)\ \mu\text{m}/80=50\ \text{nm}$,目前没有这样的微孔加工与定位准确度.实际上,当掩膜孔尺寸与光纤芯径相当后,无论如何排列,一个透光孔至少会对应三个以上的光纤,如图 5 所示.当光纤芯径为 $6\ \mu\text{m}$,掩膜孔直径为 $6\ \mu\text{m}$ 时,掩膜孔最优放置时对应三个光纤,即图 5(c),此时尺寸最宽扩展为 $10.5\ \mu\text{m}$.最差时对应 7 个光纤,即图 5(a),此时尺寸最宽扩展为 $15\ \mu\text{m}$.当光纤传输的图像经 CCD 再次离散化时,情况会更加复杂,而掩膜与光纤面板之间的间距以及光纤面板与 CCD 之间的间距将会使透光区域进一步的扩散,如图 6.

图 7 是直径 $6\ \mu\text{m}$ 的圆孔阵列掩膜经光锥耦合后形成的实际图像(局部区域放大),光锥的放大倍数为 1.3 倍,设计孔的行间隔为 $102\ \mu\text{m}$ (6 像素)、交错列间隔为 $34\ \mu\text{m}$ (2 像素,图中直线为设计的相邻列),由实际的效果图可以看出,原本小于单个像素的孔扩散为大于 3×3 的像素矩阵.每个发光区域的最亮像素占据着整个区域较多的能量,并且在垂直方向上形成了最亮区域的存储与图像转移通道(图中箭头所示).此时由于透光区域的扩散,将减少

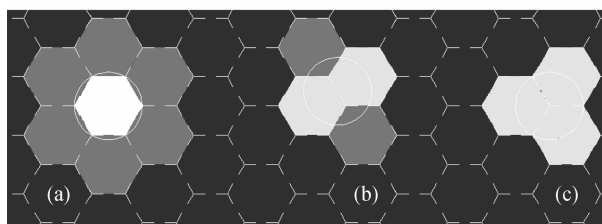


图 5 $6\ \mu\text{m}$ 孔(圆形)与 $6\ \mu\text{m}$ 光纤面板(蜂窝状)耦合示意图
Fig. 5 Diagram of optical coupling with $6\ \mu\text{m}$ -size hole(circle) and $6\ \mu\text{m}$ -size optical fiber panel(honeycomb)

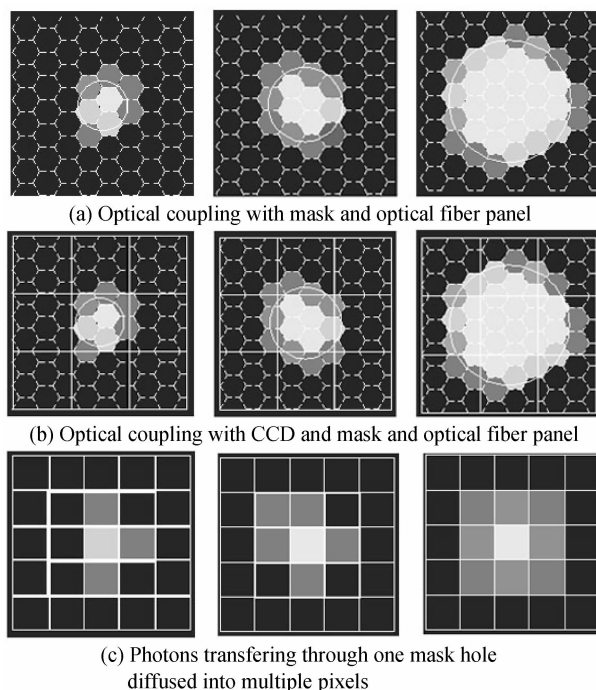


图 6 掩膜孔(圆形)经光纤面板(蜂窝状)后在 CCD 像元(正方形)上最终形成的图像
Fig. 6 Images obtained by CCD pixels(square) covered by mask hole(circle) and optical fiber panel(honeycomb)

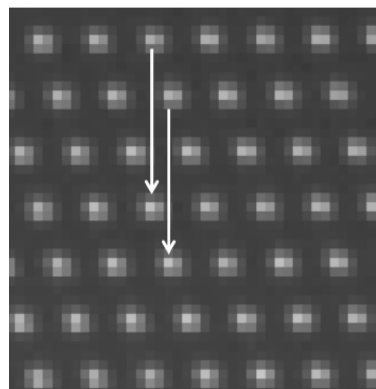


图 7 光锥耦合 CCD 覆盖 $6\ \mu\text{m}$ 圆孔阵列掩膜实测图像
Fig. 7 Image obtained by CCD covered by $6\ \mu\text{m}$ -size circular-hole-array mask

图像存储数量,并使得相邻时刻的图像存在交叠曝光现象,影响相邻时刻图像的复原。

2.2 重心点图像复原方法

一个掩膜孔对应的区域理想状态为一个像素点,这个孔透过的光强积分即是该像素点的强度(像素灰度、总能量)。阵列孔掩膜可以理解对二维图像的采样过程,每个孔采样一个像素(采样像素)。根据掩膜孔扩散的特点与理论分析,由于扩散效应使得一个很小的透光孔变成 3×3 以上的像素区域,在进行图像复原计算时,需要把这一区域作为一个像素处理,这一区域中所有像素的强度总和即为采样像素的总能量。由于扩散效应使得孔的透光量计算变得复杂,如果能够选取扩散后的像素阵列中的一个值计算整个区域的光强值,那么将可以简化计算。本文采用重心点作为透光区域的代表像素,并以此计算透光区域的实际光强积分能量。对于确定的透光区域,可以利用式(2)来确定其重心点,即

$$\mathbf{R}_{bc} = \frac{m_1 \mathbf{R}_1 + m_2 \mathbf{R}_2 + \dots + m_n \mathbf{R}_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (2)$$

式中 \mathbf{R}_{bc} 是重心点的位置向量, $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n$ 是透光区域中每个像素点的位置向量,对应的 m_1, m_2, \dots, m_n 是每个像素点的权重大小,即像素灰度值,该方法也适用于不规则的透光区域

为消除单幅图像随机噪声的影响,对于每个透光区域,在均匀光照条件下采集 100 幅以上的图像,求出每个区域内所有像素的多幅图像的灰度平均值,把每个区域内的像素灰度进行累加积分,得到各个区域的总能量,再用区域内像素的灰度平均值除以区域总能量,得到像素权重系数,并以此来恢复计算目标像素的实际灰度值。采用重心点搜索算法对实际的掩膜图像处理结果如图 8。

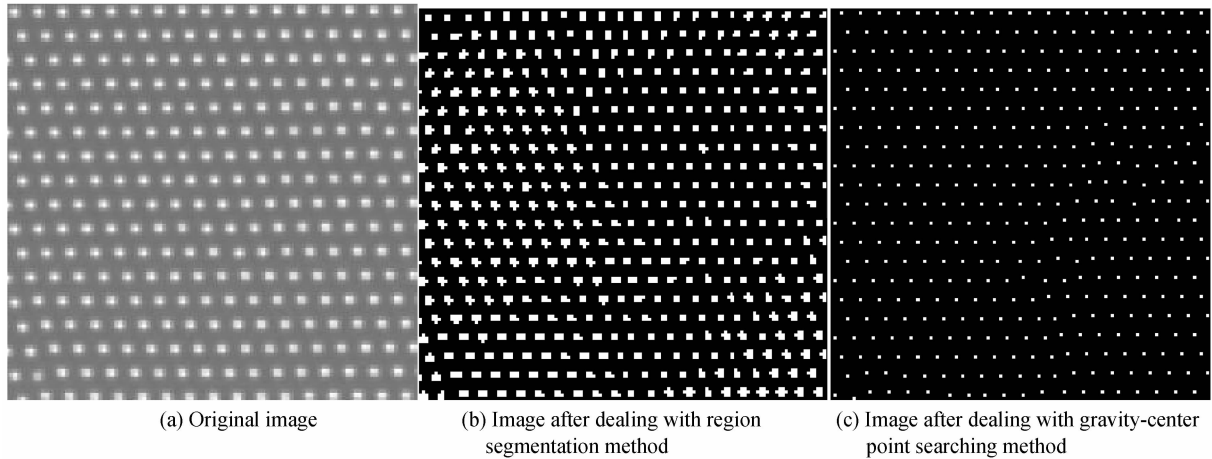


图 8 重心点像素搜索结果

Fig. 8 Result of gravity-center point searching method

重心点的算法是以掩膜后 CCD 的单个曝光图像为基准进行计算的,即掩膜后的 CCD 工作在正常状态,每幅图像曝光一次。所得的图像可以用来确定掩膜孔的位置、扩散区域大小、透光孔重心点位置等。当掩膜 CCD 工作在超高速状态时,所得的一幅图像包含有多幅序列图像,图像复原算法还需要把多幅图像从原始图像中分离出来,再把采样像素按规律重新排列,以获得掩膜后的多幅序列图像。对于序列图像的分离复原算法,本文提出了两种实现方法:重心点共线式图像复原算法和区域膨胀式图像复原算法。

2.2.1 重心共线式图像复原算法

由于阵列式的掩膜采用的是水平与垂直对称采样,两个方向的采样像素点数量相同,因此,阵列式掩膜的采样像素具有水平与垂直两个排列方向(水平线与垂直线)。重心点共线式图像复原算法(简称共线算法)具体实施过程是在水平方向上把同一条采样线上的重心像素点重新排列,作为一个新的像素行,而后把所有的新像素行在垂直方向按采样顺序进行排列,得到一幅新的二维像素阵列,即一个时刻的掩膜图像。沿垂直方向,把重点像素点位置下移一个像素行,重新按照水平与垂直两个方向排列新的重心点像素,即可得到第二幅掩膜图像。重复 n 次下移重心点像素位置与重新排列像素的过程,最终可获得 n 幅掩膜图像,即 n 个时刻的序列图像。

由于掩膜在与 CCD 进行耦合时,很难保证透光孔的采样线完全与 CCD 的像素行平行,它们之间总会有

一个微小的夹角,所以实际的采样线有一定的斜率.当斜率不大时,共线算法可以获得很好的图像结果,但是当斜率过大时,由于不同水平采样线的重心点像素会在水平方向上交叉,会使直线拟合效果变差,严重时采用共线算法无法恢复出正确图像.

共线算法是依据掩膜的采样特点提出的一种算法,由于掩膜在采用阵列式孔结构时在垂直方向不是一个严格的直线,因此恢复的图像在垂直方向会出现边缘的“Zigzag (锯齿)”现象,如图 9.

2.2.2 区域膨胀式图像复原算法

共线算法的应用有一定的局限性,特别是在图像有部分缺陷时,很难恢复出正确图像.针对于此,本文提出一种区域膨胀式图像复原算法(简称膨胀

算法).该算法不对重心点像素进行重新排列,而是根据重心点像素所在位置把图像划分为若干区域,再根据重心点的灰度值对区域进行图像数据的重新填充,获得一幅放大的掩膜图像.膨胀算法是利用重心点可以代表一个区域的像素灰度的特点而提出的一种图像复原算法,算法的核心是对图像进行区域的重新划分.重心点可以作为一个特定区域的图像灰度值的平均值,每个重心点都有一定的势力范围,其它像素根据最小距离法确定属于哪个重心点的势力范围,并以此划分区域.

由于膨胀算法没有把图像进行重新排列,因此对掩膜的缺陷不敏感,也没有明显的锯齿状边缘.图 10 为一幅部分曝光且带有缺陷的掩膜图像通过共线算法与膨胀算法恢复的图像结果对比.可以看出,对于有明显缺陷、图像部分缺失、水平采样线斜率过大等掩膜图像采用膨胀算法可以得到较好的图像恢复效果.

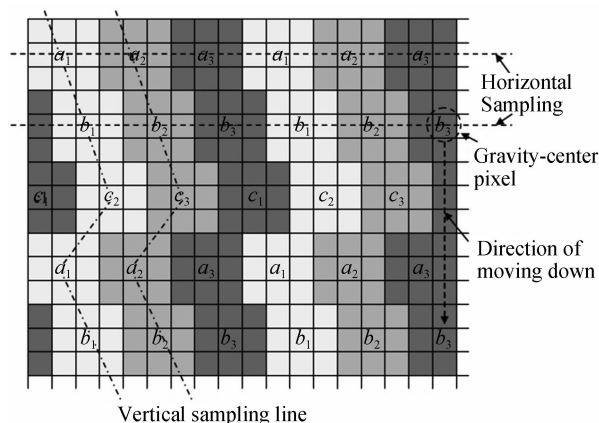


图 9 重心点共线式图像复原算法示意图

Fig. 9 Diagram of gravity-center-point collineation image restoration algorithm

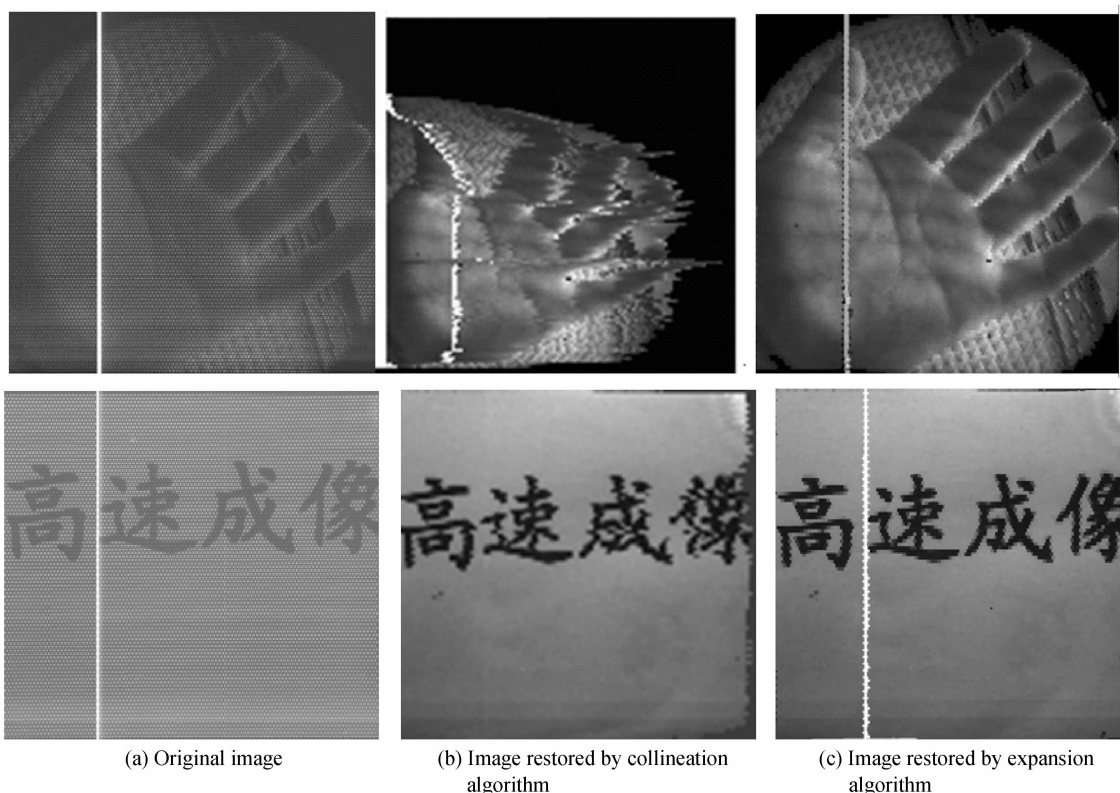


图 10 部分曝光掩膜图像的不同图像复原算法效果对比

Fig. 10 Comparison among image results processed with different image restoration algorithm

3 实验验证

采用间隔式掩模板、利用光纤面板耦合的 EMCCD 相机进行了每秒百万帧工作速度的验证. EMCCD 相机使用英国 E2V 公司研制的 CCD201, 该 EMCCD 芯片为帧转移 CCD 芯片, 光敏区与帧存储区采用二相 CCD 结构, 帧频率每秒 8 帧. 采用光纤面板间接耦合的方式进行二次掩膜, 掩膜仅覆盖于光敏区, 采用的是条状孔掩膜结构. 根据掩膜结构更改了 EMCCD 光敏区的控制时序, 在同步触发条件下, 先产生一组快速序列驱动脉冲, 用来记录高帧频图像, 而后再产生正常时序, 输出图像. 快速序列脉冲时(序列模式)光敏区的正常驱动时钟周期从 $1\ \mu\text{s}$ 缩短到 $500\ \text{ns}$, 以提高序列模式时的帧频率. 虽然提高驱动时钟周期会降低转移效率 η , 但对于只需 20 个转移周期的序列过程来说, 转移效率的影响 $(1-\eta^{20})$ 较小, 即使当 $\eta=0.999$ 时影响也不到 1%. 此时基于 EMCCD 构建的掩膜式 CCD 成像系统最高等效帧频率可以达到每秒 2 百万帧.

采用的掩模板透光孔大小为 $14\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$, 孔与孔之间水平距离为 $169\ \mu\text{m}$, 垂直方向开孔行与行之间的距离为 $169\ \mu\text{m}$, EMCCD 的像素尺寸为 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$. 因此, 经掩膜后图像水平方向对应开孔距离为 $169\ \mu\text{m}/13\ \mu\text{m}=13$ 个像素, 由于采用了间隔采样方式, 垂直方向透光孔与孔之间的距离为 $338\ \mu\text{m}$, 即距离为 26 个像素. 垂直方向的距离可以用来存储图像数据, 此时最多可以存储 26 幅图像. 覆盖后采集到的图像如图 11 所示, 图像分辨率为 1024×1024 像素(图 11(b)), 图像孔与孔之间的距离与理论设计相符, 所得图像为若干个小的透光方孔, 经过计算恢复后得到一幅 79×79 像素的图像(图 11(c)), 能够分辨出图像中的字符.

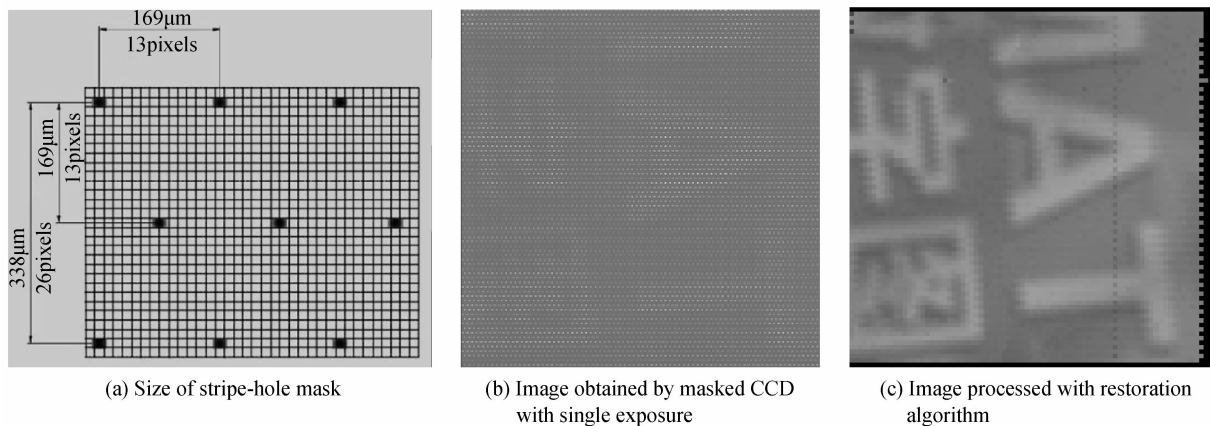


图 11 掩膜覆盖后单次曝光图像及恢复后的图像

Fig. 11 Image obtained by masked CCD with single exposure and image processed with restoration algorithm

把脉冲氙灯的发光区域作为快速变化过程, 利用掩膜后的 EMCCD 相机记录, 测试掩膜成像系统的时间分辨能力. 采用光电管监测显示, 脉冲氙灯的发光时间半高宽为 $3\ \mu\text{s}$, 总时间约为 $8\ \mu\text{s}$, 触发信号与光电管的监测波形如图 12 所示. 掩膜 EMCCD 的转移时钟周期 $500\ \text{ns}$, 采用光触发信号对 EMCCD 进行同步, 获得了氙灯位置与掩膜后的图像, 如图 13 所示. 以发光起始点为时间“0”点, 恢复出了 14 幅发光过程图像(图 13(c)). 图像展示了氙灯光源由弱到强直至余辉逐渐消失的过程, 对应等效帧频率为每秒 200 万帧, 分辨率 79×79 像素.

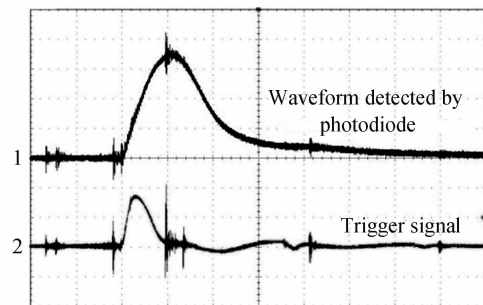


图 12 脉冲氙灯发光光电管监测波形与触发信号波形
Fig. 12 Light-intensity waveform of pulse xenon lamp detected by photodiode and trigger signal waveform

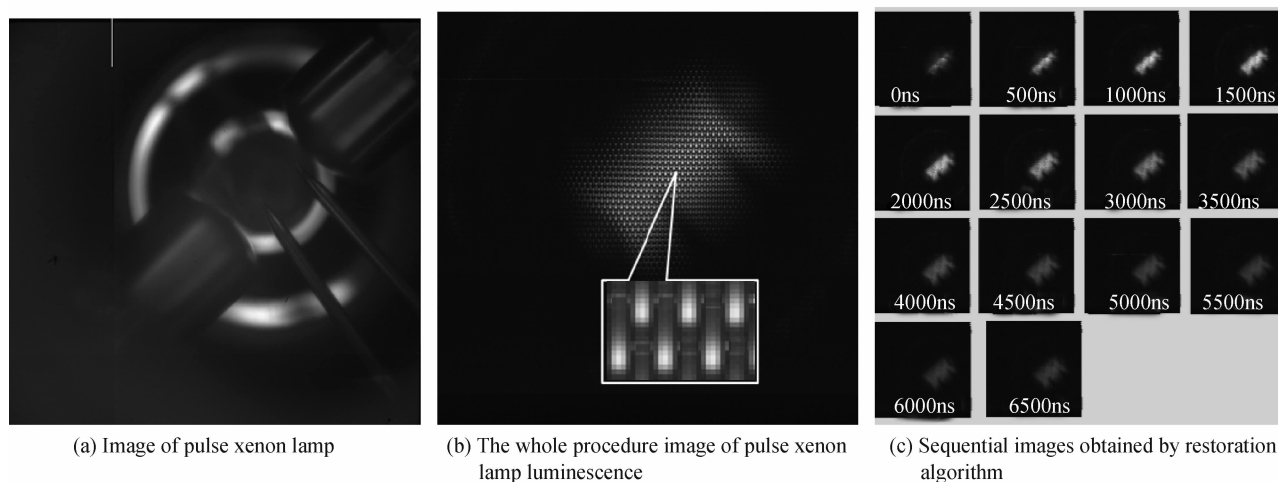


图 13 脉冲氙灯发光区域变化过程
Fig. 13 Changing process images of pulse xenon lamp luminescence

4 结论

针对 CCD 自身结构与工作机理对其帧频率的限制,本文提出了一种基于普通 CCD 实现每秒百万帧高速成像系统的方法.对 CCD 光敏区覆盖掩膜的方式获得 CCD 的片上存储功能,可以把普通 CCD 的帧频率提高到每秒百万帧的水平.采用不同的掩膜结构可以实现不同分辨率与存储画幅数的超高速 CCD,对比了三种掩膜结构的优缺点,其中点状孔方式的掩膜的 CCD 像素利用率最高.采用先用光纤面板与 CCD 耦合再进行金属掩膜覆盖的方式建立了掩膜 CCD,通过对掩膜方式和掩膜图像的分析,讨论建立了掩膜图像的恢复算法.采用本文所述方法建立了基于普通 CCD 的每秒百万帧超高速成像系统样机,样机等效帧频达到每秒 200 万帧,分辨率为 79×79 像素,获得了 14 幅超快过程的图像.本文建立的超高速成像技术方法对全帧转移 CCD 和帧转移 CCD 具有通用性,通过选取合适的 CCD 芯片和掩膜参量,可以建立更高分辨率和更高帧频的超高速成像系统.

参考文献

- [1] LI Jing-zhen. Time amplifying techniques towards atomic time resolution[J]. *Science in China*, 2009, **52**(12): 3425-3446.
- [2] LEVINE P, PATTERSON D, ESPOSITO B, *et al.* High-frame rate multiport CCD imager and camera[C]. SPIE, 1993, **1757**: 257-267.
- [3] TURKO B, YATES G, ALBRIGHT K, *et al.* High-speed camera with a back-thinned 16-port frame transfer CCD sensor[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, **42**(6): 2327-2330.
- [4] XIA Jing-tao, YANG Shao-hua, GUO Ming-an, *et al.* Design and realization of remote acquisition of high speed image data for multi-port CCD camera[C]. International Conference on Information Electronic and Computer Science, 2010:73-76.
- [5] EPPERSON P, DENTON M. Binning spectral images in a charge-coupled device[J]. *Analytical Chemistry*, 1989, **61**(14): 1513-1519.
- [6] LI Hao, ZHANG Hui, GUO Xiao-Lian, *et al.* Image restoration after pixel binning in image sensors[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, **14**(4): 541-545.
- [7] ZHOU Wang, SHEN Wei-min, ZHOU Jian-kang. Experimental research for binning technique in spectroscopy[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2010, (4): 41-45.
周望, 沈为民, 周健康, 等. Binning 技术在光谱仪中的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, (4): 41-45.
- [8] 李斌康, 杨少华, 郭明安, 等. 可提高 CCD 帧频率的图像采集方法: 中国, 200910219144. 5[P]. 2010-06-02.
- [9] 杨少华, 李斌康, 罗通顶, 等. 一种超高速双帧图像获取方法: 中国, CN201410386427. X[P]. 2014-10-21.
- [10] 罗通顶, 李斌康, 杨少华, 等. 一种基于抽样的 CCD 超高速图像采集方法: 中国, 201310247696. 3[P]. 2013-10-23.
- [11] SUO Jin-li, JI Xiang-yang, DAI Qiong-hai. An overview of computational photography[J]. *Information Sciences*, 2012, **55**(6): 1229-1248.
- [12] AGRAWAL A, XU Y. Coded exposure deblurring: optimized codes for PSF estimation and invertibility [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami FL: IEEE Computer Society,

2009; 2066-2073.

- [13] TAI Y, KONG N, LIN S, *et al.* Coded exposure imaging for projective motion deblurring[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 10), IEEE Press, 2010; 2408-2415.
- [14] ETOH T, TAKEHARA K, OKINAKA T. Improved design of an ISIS for a video camera of 1,000,000 pps[C]. SPIE, 1999, 3642.
- [15] ETOH T, SON D, YAMADA T, *et al.* Toward one Giga frames per second-evolution of in situ storage image sensors [J]. *Sensors*, 2013, **13**(4): 4640-4658.
- [16] TURCHETTA R. Kirana: a solid-state megapixel uCMOS image sensor for ultrahigh speed imaging[C]. SPIE, 2013, **8659**: 865903.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11475138, 11075131)