

文章编号: 1002-2082 (2020) 01-0001-09

编码曝光相机系统设计

李响^{1,2}, 李明伟¹, 孙怡¹

(1. 大连理工大学 信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海洋大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 在研究编码曝光理论基础, 设计了应用型嵌入式编码曝光相机系统。在采集运动目标图像时, 按照预设的编码时序控制曝光快门, 得到了光生电荷多次叠加一次转移的图像。该图像为具有编码曝光信息的运动模糊图像, 有更多的图像细节信息。编码曝光图像信号经过AD转换后将数据暂存在数据存储器, 再经核心器件解码模块输出复原图像。实验结果证明, 编码曝光相机能有效解决线性运动模糊问题。在相同测试条件下, 利用无参考图像评价指标测试, 编码曝光条件下复原图像质量的指标平均值均比一般单次曝光条件下复原图像质量提高了近2倍。

关键词: 编码曝光; 图像去模糊; 嵌入式系统; 相机设计

中图分类号: TN203; TB852.12

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0101001

System design of camera for coded exposure

LI Xiang^{1,2}, LI Mingwei¹, SUN Yi¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Based on the theory of coded exposure, an applied embedded coded exposure camera system was designed. The exposure shutter of camera was controlled according to the preset coding sequence when collecting the moving target image, and the image of photo-generated charge multiple superimposed with a transfer was obtained. The acquired image was a motion blurred image with coded exposure information, which had more details of the target. The data was temporarily stored in the data memory by the coded exposure image after the AD conversion, and the restored image was decoded by the core device. The experimental results show that the coded exposure camera can effectively solve the problem of linear motion blur. In the same conditions, the index average value of restored image quality under coded exposure condition is increased nearly twice than that of restored image quality under single exposure condition by using the no-reference image evaluation index test.

Key words: coded exposure; image deblurring; embedded system; camera design

引言

图像去模糊是图像与计算机视觉应用中的一个重要问题^[1]。产生图像运动模糊的原因是, 在传感器的曝光时间内, 运动目标与静态相机之间产生了较大的相对位移所致。一般图像模糊模型可表示为

$$B = L \otimes K + \eta \quad (1)$$

式中: L 代表目标的原始清晰图像; K 表示在图像

采集时目标与相机的相对运动(模糊核); η 表示叠加的成像系统噪声; B 表示降质后的图像; 符号 \otimes 代表卷积。由于原始图像及其成像系统的降质情况未知, 因此, 仅由实际采集到的图像去重建清晰图像是一个不可逆的病态问题^[2]。在目前的图像复原研究中, 甚少考虑图像采集过程出现的问题对图像质量的影响, 只是针对模糊图像本身进行数学建模反演、恢复重建。图像在采集过程中发生信息损失不能在后续的复原中恢复。因此只针

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-09-25

基金项目: 国家重大仪器专项 (2014YQ240445); 辽宁省教育厅科学研究项目 (QL201716)

作者简介: 李响 (1983-), 男, 博士研究生, 主要从事图像复原及其电路设计方面的研究。E-mail: dianze613@hotmail.com

通信作者: 孙怡 (1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与重构方面的研究。E-mail: lslwf@dlut.edu.cn

对采集图像进行图像恢复重建,而不考虑图像采集过程的信息损失,这种图像复原是不完善的。

通常的成像方式是控制相机快门一次开启形成曝光,曝光时间决定了成像的空间分辨能力。根据信号时频关系,曝光时间越长(越宽),其频域带宽越窄,保留目标的高频分量越少,对运动目标的成像越模糊^[3]。为减少频域中高频信息的损失,有学者^[4-10]提出将一次曝光转换为依据特定编码的多次曝光模式,进而保留原有目标图像更多的信息。在编码曝光研究实验中,简单的方法是采集多帧连续图像叠加融合成编码曝光图像^[6, 11-14],这种方式只是模拟编码曝光产生过程,而非真正的单张编码曝光图像。另外也有利用图像传感器测试平台来获得编码曝光图像。

上述编码曝光图像都要经过后处理解码,才能得到去运动模糊的清晰图像。本文设计的编码曝光相机,针对应用需求,将编码曝光过程和清晰图像的解码复原输出过程集成在一起,实现了对 CCD

器件持续编码曝光控制和一次电荷转移输出,并用 FPGA 的硬件逻辑结合 IP 核的方式实现高速智能化解码。

1 编码曝光原理与实现

1.1 编码曝光去模糊原理

编码曝光模型是将一个完整的曝光时间分成 m 个相等时间的时隙,每个时隙是否曝光由对应位的二进制编码决定,这里编码长度和时隙数量相等。若编码 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_m)$,则对应的编码曝光模糊核可由 k_i 确定。若 $k_i = 1$,表示该时隙曝光;若 $k_i = 0$,表示该时隙不曝光,其中 $i \in [0, m]$ 。为方便研究,(1)式的图像采集模型用矩阵形式表示为

$$\mathbf{B} = \mathbf{K} \otimes \mathbf{L} \quad (2)$$

利用 Toeplitz 矩阵可将图像与模糊核之间的矩阵卷积转化为矩阵乘积。以一维信号为例,若采集长度为 n 的一维信号与长度为 m 的单一方向运动模糊核卷积运算,则(2)式可由下式表示成:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{k}_1 \quad \mathbf{k}_2 \quad \dots \quad \mathbf{k}_m] \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & \dots & l_{n-1} & l_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1 & l_2 & \dots & l_{n-1} & l_n & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & l_1 & l_2 & \dots & l_{n-1} & l_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

从信号的模糊情况来看,当模糊核 \mathbf{K} 中的数据全为 1 时,即为一般意义下的连续运动模糊。当模糊核 \mathbf{K} 中的数据不全为 1 时,表示为非连续或间断的运动模糊。从快门曝光角度看,编码曝光是按照一定频率由预先设定的编码来控制快门的开启和闭合。现以成像系统与目标物体的一维相对线性运动为例,说明编码曝光成像和复原过程,如图 1 所示。若存在任意一维信号 l ,通过预设编码 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_m) = (1 \ 100 \ 101)$ 的成像系统曝光,其采集信号是长度为 $(n+m-1)$ 模糊信号 \mathbf{B} ,可以用 l 与 \mathbf{k} 二者的卷积表示。可以看出,图 1 的结果获得方式和(3)式的表达方式一致。

按(3)式的转换计算方法,图 1 中采集信号 \mathbf{B} 中每一位是否存在累积变化与 k_i 当前数值是否为 1 有关。若 k_i 中的值为 1,代表曝光, \mathbf{B} 的累积量增加; k_i 为 0 时,代表不曝光, \mathbf{B} 的累积量不变。

与此同时,(2)式亦可表达为(4)式的形式,我们可以在数据复原阶段利用(4)式进行解码。当 l 与 \mathbf{k} 二者做单一方向相对运动时,先通过预设编码 \mathbf{k} 构造 Toeplitz 矩阵形式的模糊核 \mathbf{K} ,之后利用采集信号 \mathbf{B} 来恢复重建一维信号 l 。

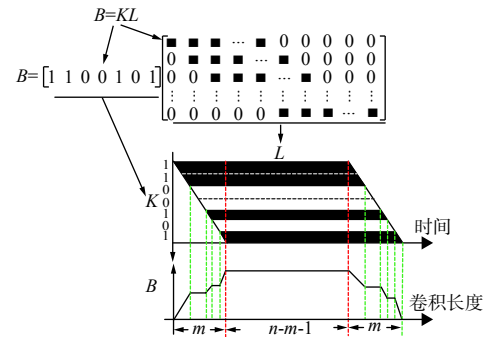


图 1 一维相对运动与卷积计算之间的关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relationship between 1-D relative motion and convolution calculation

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ k_2 & k_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & k_2 & k_1 & \dots & 0 \\ k_m & \vdots & k_2 & \dots & 0 \\ 0 & k_m & \vdots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & k_m & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

与一维信号相似,当出现二维图像信号 L 时,该模型可理解为二维目标 L 与 K 之间单一方向移动获得模糊图像 B 。当解码复原图像时,可以根据编码时的二进制序列和模糊长度构造模糊核 K ,其图像采集及理想的重建解码过程可以由 $L=B/K$ 获得。该过程如图 2 所示,图中的模糊核 K 即为(4)式所构造,并可应用到解码过程中。

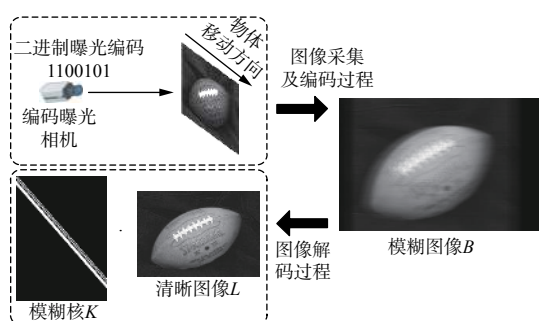


图 2 编码曝光图像采集及图像重建解码过程

Fig. 2 Image acquisition of coded exposure and process of restored image

1.2 CCD 成像的工作时序

CCD 成像过程如图 3 所示。图 3 中的灰色矩形阵列代表图像元阵列。当受光照射时,像元阵列将入射光转化为电荷,在外加衬底栅极电极下形成电荷势阱,衬底每吸收一个光子就会形成一个电子-空穴对^[15],并在外加电场作用下移动形成“光生电荷”,如图 3 中水滴形状。

势阱电压控制像元光生电荷的累积过程,衬底信号 SUB 控制势阱电压,因此 SUB 信号就是曝光

的控制变量。SUB 为 1 时,像元累积电荷;SUB 为 0 时,像元不累积电荷。因此在采集图像时需要一个 SUB 信号控制所有像元在同一时刻曝光,再由垂直、水平同步脉冲共同驱动,将累积的电荷输出形成像元阵列的所有电荷。如图 4 所示,垂直同步脉冲 VD 驱动光生电荷在垂直移位寄存器内向水平移位寄存器移动。像元阵列中所有列在同一个 VD 信号下同时驱动光生电荷一起移动。当光生电荷到达水平移位寄存器后,按顺序由水平同步脉冲驱动电荷向外输出。因此一个 VD 信号周期内,需要输出同时到达水平移位寄存器的一行光生电荷,由水平同步脉冲 HD 信号驱动顺序输出。再经过“电荷-电压”、电压放大、“模-数”转换完成后,形成数字图像阵列,即为一幅数字图像。

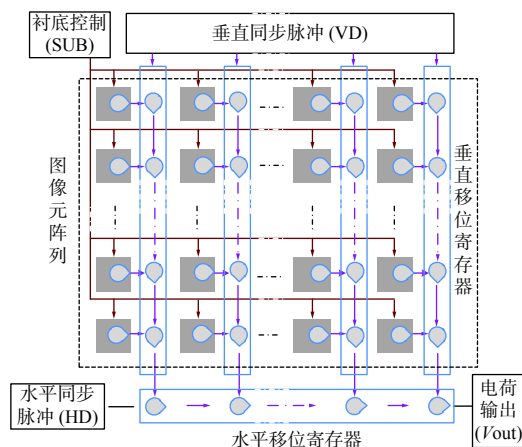


图 3 CCD 像元累积电荷转移示意图

Fig. 3 Schematic diagram of accumulative charge transfer in pixels of CCD

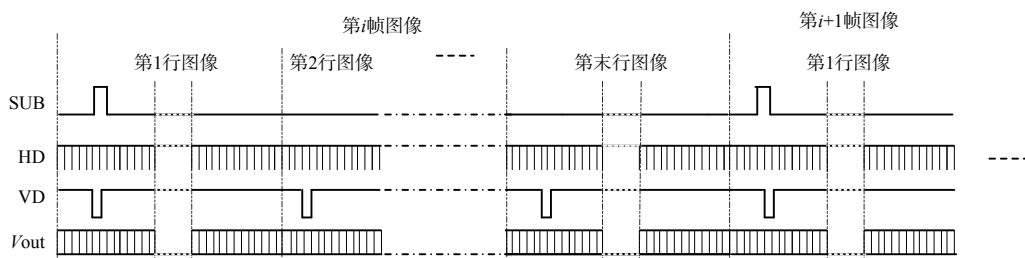


图 4 一般 CCD 图像的输出时序

Fig. 4 Output sequence of traditional CCD image

1.3 编码曝光的时序设计

普通的曝光过程一个像元累积一次、生成并转移光生电荷。为了得到编码曝光图像,需要每个像元完成多次曝光、多次累积电荷,并一次转移输出电荷。因此我们将原有的一次曝光分割成若干更小的曝光时隙,该时隙的分布和预设的编码

相关,一个像元就会多次累积曝光电荷。该过程可以由 SUB 控制,如图 5 所示,编码“10...1...1”加入曝光过程控制 SUB 后,会得到与编码相对应的编码曝光图像输出。若将电荷累积集中输出,即形成编码曝光图像。由 SUB 控制电荷是否累积,由 VD 和 HD 控制电荷是否转移并形成输出图像。

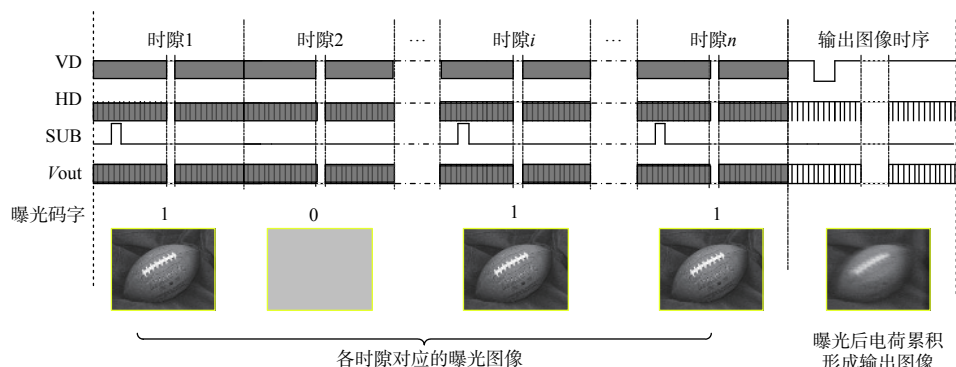


图5 像元曝光累积编码曝光电荷输出时序

Fig. 5 Charge cumulative of coded exposure in pixels and their time sequence

2 编码曝光相机系统设计

2.1 编码曝光系统的硬件设计

如图6所示,核心控制器选用Xilinx公司Spartan 6系列的XC6SLX45T-3FG484C。该芯片共484个引脚,其中DDR3存储器、程序存储器以及88E1111千兆网物理层芯片分别接于厂家典型系统默认引脚,以便利用现有资源;设计的模块外接引脚尽量布置在同一个BANK内,全局时钟使用48 MHz外部晶振;W25Q64为64 Mbit的配置程序存储器;DDR3数据存储器MT41J64M16LA有1 024 M数据存储空间,存储图像数据和运算中间结果;高灵敏度CCD图像传感器ICX204AL有效像素为 $1\,024 \times 768$,帧率为60 frame/s;CXD3400N作为场时序驱动器提供列向的三态电压时序驱动(XV2A、XSG1、XV2B、XSG2)及衬底信号驱动(XSUB);12位CCD信号处理器AD9949作为行驱动信号发生器(H1、H2),并提供生成信号(CCD_{IN})的模数转换;88E1111是千兆网物理层芯片,通过RJ45构成网络通信接口。

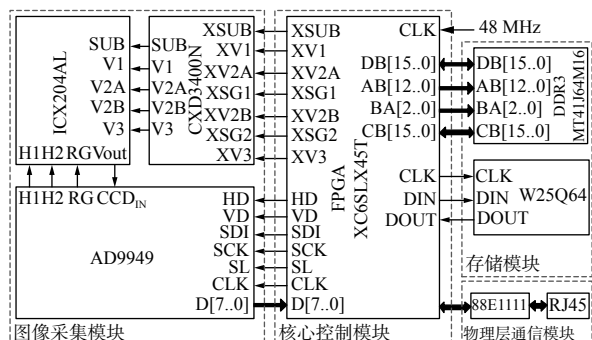


图6 编码曝光相机系统电路框图

Fig. 6 Circuit block diagram of coded exposure camera system

CXD3400N接收FPGA发出的垂直时钟转移控制信号(XV1、XV2A/XV2B、XV3)和衬底控制信号XSUB,向ICX204AL发送电荷累积和电荷垂直移位的时序信号,其中XSUB是编码曝光信号,V2A/V2B是三电平结构;FPGA向AD9949提供主时钟(CLK)、垂直同步脉冲(VD)和水平同步脉冲(HD),FPGA通过SPI总线接口控制AD9949生成水平时钟转移信号(H1、H2)和复位时钟信号(RG),AD9949也是CCD信号的模数信号转换器,将模拟图像信号转换成数字信号,通过D[7..0]输出到FPGA,FPGA的DDR3控制核将图像数据发送到存储器MT41J64M16LA。当图像采集完成后,FPGA中图像重建模块恢复出清晰图像,通过网络通信接口输出,可由上位机接受显示。

编码曝光相机系统结构如图7所示,主要由核心控制模块和外部芯片功能模块组成。核心控制模块的功能设计如下:外部晶振通过全局时钟引脚到核心控制模块中的基准时钟模块,作为系统的时钟基准。时序模块产生CCD传感器的驱动时序。曝光编码模块作为传感器配置模块的输入变量,向图像采集模块的时序驱动模块提供曝光序列。传感器配置模块同时对处理模块产生的垂直同步脉冲和水平同步脉冲信号进行编辑。图像读取模块利用DDR控制模块将数据保存在数据存储器中,这时得到了编码曝光图像数据。随后核心控制器中的解码重建模块读取数据存储器中编码曝光图像,进行片内解码得到清晰复原图像。图像数据经千兆网模块可输出显示,也可以直接输出编码曝光图像。命令模块接受网络的输入信号,可以进行系统设置。千兆网模块和DDR控制均为厂家提供的资源。

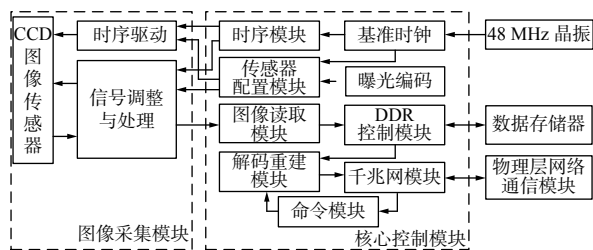


图7 CCD 编码曝光相机系统结构

Fig. 7 Structure diagram of CCD coded exposure camera system

编码曝光图像采集及输出时序图如图 8 所示。由于 ICX204AL 总像素为 $1\,034 \times 792$, 输出一幅图像需要 VD 控制信号 1 034 个, 且每个 VD 信号含 792 个 HD 信号。相机快门开关由 SUB 信号控制, HD 信号为低电平时, 垂直时钟信号按 V1、V2A/V2B、V3 顺序开始工作, 并将存于垂直移位寄存器中的光生电荷向水平移位寄存器移动。V2A/V2B 的高电平信号决定了新一行图像的起始位置。

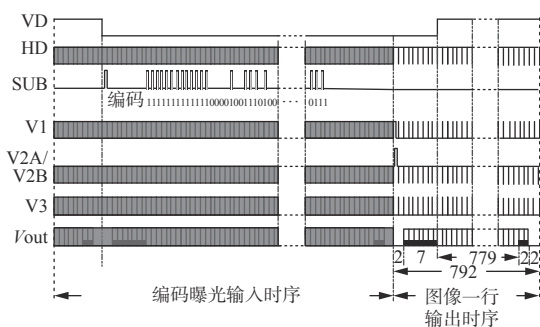


图 8 编码曝光图像采集及输出时序图

Fig. 8 Schematic diagram of image acquisition and timing sequence output with coded exposure

2.2 编码曝光系统的软件设计

编码曝光解码图像程序流程图如图 9 所示。曝光编码在控制像元曝光衬底信号 SUB 的同时, 也被用作图像复原时构造模糊核 \mathbf{K} , 以便解码复原。若已经得到编码曝光模糊图像 \mathbf{B} , 利用 $\mathbf{L} = \mathbf{B}/\mathbf{K}$ 解码获得清晰图像输出。上述过程由 FPGA 的硬件逻辑实现。

文献 [16] 中提出,同一目标以不同相对速度通过采集相机时,在采集图像的像平面中位置不同,导致采集的模糊图像不同,即可以认为由不同模糊核造成。由于模糊核是由预设编码的 Toeplitz 矩阵形式和与其等宽且不等长的模糊尺度构成,因此采用结构相似性与图像熵的联合估计方法 [16] 确定图像模糊核的模糊尺度,并与二进制编码一起构造模糊核。具体编码曝光解码复原过程如下:

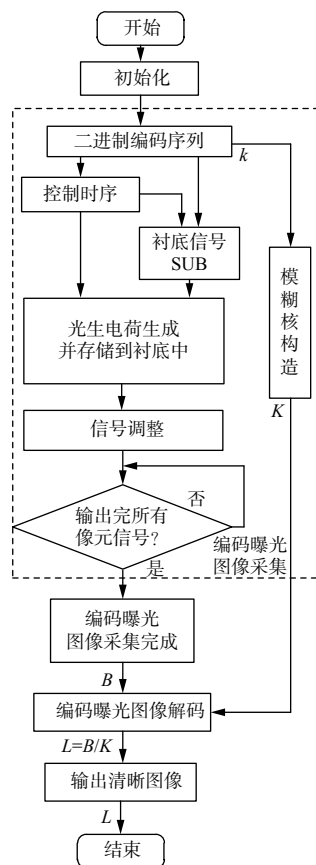


图9 嵌入式编码曝光系统程序流程图

Fig. 9 Flow chart of program design for embedded coded exposure system

- 1) 在核心控制器内预设码长为 m 的二进制编码序列 \mathbf{k} ;
- 2) 通过设定模糊尺度与 \mathbf{k} 共同构造模糊核 \mathbf{K} ;
- 3) 通过 $\mathbf{L} = \mathbf{B}/\mathbf{K}$ 解码获得清晰图像, 并输出显示。

3 编码曝光图像复原性能实验

3.1 编码曝光复原图像性能理论分析

从信号生成角度看: CCD 成像芯片之所以能够产生图像信号,是由于 CCD 的感光像元作用。当外界有入射光到达像元后,光生电荷随之产生,其数量与入射光的光通量呈线性关系。因此,当不考虑其他因素时,曝光时间长短决定了入射光线的光通量的大小,进而反应了光生电荷的多少。长时间曝光比短时间曝光图像电压更高,信号更强,从外界来看图像更亮。当外部环境较暗时,适当延长曝光时间,可以有效解决图像信号不足。当外部环境较亮,长时间曝光易出现图像饱和。

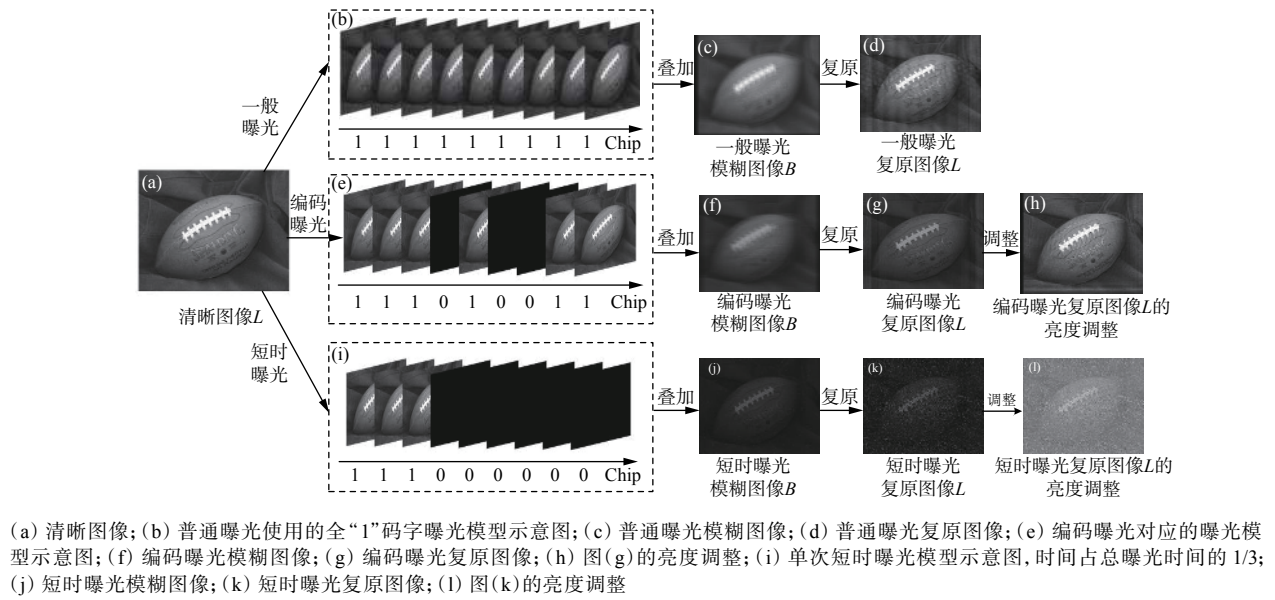


图 10 一般曝光、编码曝光、短时曝光的采集运动模糊图像、曝光模型、复原图像之间的对比

Fig. 10 Comparison among motion blurred images, exposure models and restored images under general exposure, coded exposure and short-time exposure conditions



图 11 编码相机硬件电路实物图

Fig. 11 Hardware circuit diagram of coded camera

在编码曝光时间内, 被测物体在相机镜头前做快速的单一方向移动, 曝光结束后获得编码曝光图像, 通过已知编码设计, 并估计模糊核长度, 从而得到模糊核, 恢复图像。该过程获得的编码曝光图像如图 12 所示。图 12(a)是静止清晰图像, 图 12(b)是编码曝光图像, 图 12(c)为本文方法恢复重建图像。

为了客观评价图像复原质量, 我们使用了 SMD、SMD2、Energy、Brenner 等无参考质量评价方式对

复原质量进行测评。由于高频分量在运动模糊图像中有损失, 呈现细节模糊, 但图像复原正确, 高频图像细节信息清楚, 因此可以利用高频信息数量表示图像清晰程度, 即选用灰度差分函数(SMD)和灰度差方函数(SMD2)。这两者分别表示图像中相邻像素差的绝对值之和以及相邻像素差的乘积之和。由于自然图像边缘清晰、明显, 为了突出目标图像的特征, 选用能量梯度函数(Energy)和Brenner 梯度函数(Brenner), 分别表示图像中相邻像素的梯度之和以及相隔像素的差方之和。同时, 图 12 的实验中清晰图像已知, 我们加入了图像结构相似性评价。如表 1 所示, 在全参考图像质量评价的图像结构相似性以及无参考图像质量评价方面, 复原图像均高于模糊图像指数值, 说明复原图像质量得到提升。

为了获得同一条件下的对比实验, 在同一个编码曝光相机上, 采用全“1”的码字, 类比一般单次相机曝光模型。需要获得同一条件下的运动模糊

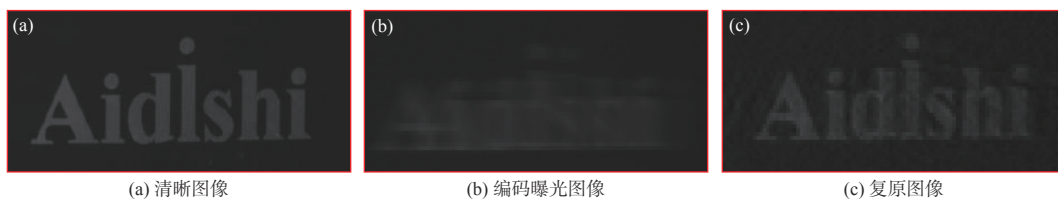


图 12 清晰图像、编码曝光图像与复原图像

Fig. 12 Clear image, coded exposure image and restored image

表1 图12中编码曝光实验的图像质量评价指数

Table 1 Image quality evaluation index of coded exposure for Fig. 12

	清晰图像	复原图像	模糊图像
SSIM	1	0.69	0.66
SMD ($\times 10^4$)	1.90	1.85	1.69
SMD2 ($\times 10^4$)	2.26	1.20	0.30
Energy ($\times 10^4$)	16.06	8.38	5.75
Brenner ($\times 10^4$)	10.91	9.48	2.96

图像,拍摄时物体的运动在伺服系统下进行,保持速度、光照等外部条件接近一致。由于Pan^[18]的基于强度和梯度先验的L0正则化图像去模糊方法,对文字和图形图像均具有很强的重建能力,因此本文选取该方法与本文的编码相机恢复方法进行对比,获得的模糊图像及其复原图像如图13所示。

在图13中,编码曝光图像13(a)与普通曝光模糊图像13(c)相比,视觉上的模糊程度是相近的,但编码曝光亮度偏暗。然而,由于编码曝光图像中隐含着图像的高频信息,因此重建恢复图像在文字笔画及结构上更加清晰,如编码曝光的恢复图像的放大图13(e)中,中文的“硕士”、“采集”与普通曝光恢复图像13(f)中相应二字清晰度更高。

表2 图13中编码曝光实验的图像质量评价指标

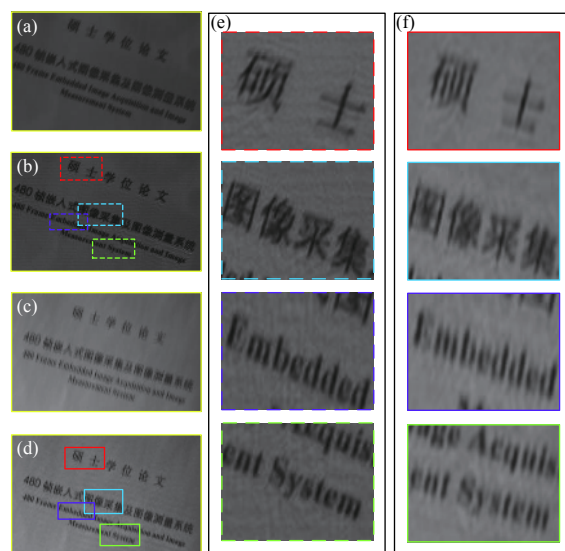
Table 2 Image quality evaluation index of coded exposure for Fig. 13

	编码曝光 ($\times 10^5$)			一般曝光 ($\times 10^5$)		
	复原图像	模糊图像	指标提升率	复原图像	模糊图像	指标提升率
SMD	2.18	1.16	87.93%	1.87	1.38	35.51%
SMD2	4.51	2.67	68.91%	3.46	2.48	39.52%
Energy	13.55	7.83	73.05%	11.71	8.85	32.32%
Brenner	11.44	7.73	47.99%	10.14	7.35	37.96%
平均值	—	—	69.47%	—	—	36.32%

从表2中可以看出,一般单次曝光和编码曝光的复原图像均比模糊图像指标要高,说明恢复了部分高频信息。经过进一步对比指标的提升率发现,图13中测试图像的各测试指标平局值从一般曝光情况下的36.32%提高到编码曝光条件下的69.47%,复原后图像质量的指标平均值提高了近1倍,说明编码曝光条件下的复原能力要更强。

4 结论

本文设计了一种运动图像去模糊的嵌入式编



(a) 本文方法采集的编码曝光图像; (b) 本文方法恢复重建图像; (c) 普通曝光模糊图像; (d) 普通曝光恢复图像; (e) 图像(b)的局部放大图像; (f) 图像(d)的局部放大图像

图13 本文采集编码曝光复原图像与普通曝光去模糊方法^[18]复原图像对比

Fig. 13 Comparison between restored images of coded exposure restored method and general exposure deblurred method^[18]

在英文方面,“Embedded”和“System”等单词可读性亦更强。为了客观评价图像复原质量,选取上述无参考图像质量评价指标,如表2所示。

码曝光相机系统。利用CCD衬底控制技术,实现持续编码曝光控制和一次电荷转移读出光生电荷,从而获得编码曝光图像。同时,将图像的解码过程在同一控制器中实现,获得清晰运动复原图像。实验结果表明,本文所设计的嵌入式图像系统能够解决运动模糊图像的复原问题。以较低成本实现较高帧率相机的清晰复原图像,并利用无参考图像评价指标测试,与一般曝光相比,相关指标提升的平均值约为一般普通曝光相关指标值的2倍。

参考文献:

- [1] LU Xiaodong. Restoration of motion-blurred image by generalized inverse method based on SVD[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 90-94.
鲁晓东. 基于奇异值分解的运动模糊图像广义逆恢复方法[J]. *应用光学*, 2013, 34(1): 90-94.
- [2] SHAN Q, JIA J, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-10.
- [3] AGRAWAL A, XU Y. Coded exposure deblurring: Optimized codes for PSF estimation and invertibility[C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2009: 2066-2073.
- [4] TAI Y W, KONG N, LIN S, et al. Coded exposure imaging for projective motion deblurring[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2010, 2408-2415.
- [5] MCCLOSKEY S, VENKATESHA S, MULDOON K, et al. A low-noise fluttering shutter camera handling accelerated motion[C]//2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision. USA: IEEE, 2015: 333-340.
- [6] HUANG K, ZHANG J, HOU J. High-speed video capture by a single flutter shutter camera using three-dimensional hyperbolic wavelets[J]. *Optical Review*, 2014, 21(5): 509-515.
- [7] DING Y, MCCLOSKEY S, YU J. Analysis of motion blur with a flutter shutter camera for non-linear motion[J]. *European Conference on Computer Vision: Lecture Notes in Computer Science*, 2010, 6311: 15-30.
- [8] HUANG Kuihua. Optimization of coding exposure technology in information integration[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
黄魁华. 信息集成中编码曝光技术优化研究[D]. 国防科学技术大学, 2014.
- [9] JEON H G, LEE J Y, HAN Y, et al. Generating fluttering patterns with low autocorrelation for coded exposure imaging[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, 123(2): 269-286.
- [10] JEON H G, LEE J Y, HAN Y, et al. Multi-image deblurring using complementary sets of fluttering patterns[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(5): 2311-2326.
- [11] AGRAWAL A, RASKAR R. Optimal single image capture for motion deblurring[C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2009: 2560-2567.
- [12] HOLLOWAY J, SANKARANARAYANAN A C, VEERARAGHAVAN A, et al. Flutter shutter video camera for compressive sensing of videos[C]//2012 IEEE International Conference on Computational Photography. USA: IEEE, 2012: 1-9.
- [13] HARSHAVARDHAN S, GUPTA S, VENKATESH K S. Flutter shutter based motion deblurring in complex scenes[C]//2013 Annual IEEE India Conference. USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [14] ZHANG J, XIONG T, TRAN T, et al. Compact all-CMOS spatiotemporal compressive sensing video camera with pixel-wise coded exposure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 9013-9024.
- [15] LI Yongyuan, XIE Xiaoping. CCD output signal processing[J]. *Journal of Applied Optics*, 1997, 18(1): 20-23.
李永远, 谢小平. CCD输出信号处理[J]. *应用光学*, 1997, 18(1): 20-23.
- [16] LI X, SUN Y. Joint structural similarity and entropy estimation for coded-exposure image restoration[J]. *Multi-media Tools and Applications*, 2018, 77(22): 29811-29828.
- [17] HEALEY R K G. CCD camera calibration and noise estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1994, 16(3): 267-276.
- [18] PAN J, HU Z, SU Z, et al. Deblurring text images via L0-regularized intensity and gradient prior[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2014: 2901-2908.
- [19] RASKAR R, AGRAWAL A, TUMBLIN J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 795-804.