

引用格式: YE Xiao-jie, CUI Guang-mang, ZHAO Ju-feng, *et al.* Motion Blurred Image Restoration Based on Complementary Sequence Pair Using Fluttering Shutter Imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0810001

叶晓杰, 崔光芒, 赵巨峰, 等. 基于闪动快门的互补序列对的运动模糊图像复原[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0810001

基于闪动快门的互补序列对的运动模糊图像复原

叶晓杰¹, 崔光芒^{1,2}, 赵巨峰^{1,2}, 朱礼尧¹

(1 杭州电子科技大学 电子信息学院, 杭州 310018)

(2 浙江省装备电子研究重点实验室, 杭州 310018)

摘 要: 针对传统曝光模式下运动模糊图像复原的病态性问题, 提出了一种基于闪动快门互补序列对的运动模糊图像复原方法. 分析了闪动快门成像原理及其码字序列在频域的相关特性, 结合编码序列对之间的信息互补特点, 引入 Golay 互补序列生成理论, 构建长度适中的二进制闪动快门互补序列对. 互补序列对的联合调制传递函数在频域上实现了信息互补, 其曲线对比单码字的调制函数具有更大的最小值和更小的方差值, 且其构成了峰值-谷值对应, 保证了互补图像序列能够相互补偿由于运动模糊所造成的空间信息损失. 引入全变分正则化模型, 构造一体化的多帧图像去模糊复原算法框架, 实现清晰图像的有效获取. 搭建了运动目标实拍仿真成像平台, 开展了仿真和实拍运动模糊复原实验. 实验结果表明, 该方法能够更好地保留场景细节信息, 获得高质量的运动模糊复原结果, 有效改善复原过程中的负效应. 相较于其他几种运动目标成像获取方式, 该方法复原图像具有更好的主客观评价结果.

关键词: 图像处理; 图像复原; 闪动快门; 运动模糊图像; 联合调制传递函数; 全变分正则化

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204908.0810001

Motion Blurred Image Restoration Based on Complementary Sequence Pair Using Fluttering Shutter Imaging

YE Xiao-jie¹, CUI Guang-mang^{1,2}, ZHAO Ju-feng^{1,2}, ZHU Li-yao¹

(1 School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(2 Zhejiang Provincial Key Lab of Equipment Electronics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the ill posed problem of motion blurred image restoration in traditional exposure mode, a method of motion blurred image restoration based on complementary sequence pairs of fluttering shutter is proposed. The imaging principle of fluttering shutter and the correlation characteristics of code sequence in frequency domain are analyzed. Combined with the information complementarity characteristics between coding sequence pairs, the Golay complementary sequence generation theory is introduced to construct binary fluttering shutter complementary sequence pairs with moderate length. The joint modulation transfer function of complementary sequence pair realizes information complementarity in frequency domain, its curve has a larger minimum value and a lower variance value than the modulation function of the single code word, and it forms peak valley correspondence, which ensures that complementary image sequence can compensate each other for spatial information loss caused by motion blur. The total variation regularization model is introduced to construct an integrated multi frame image

基金项目: 国家自然科学基金(No.61805063), 浙江省自然科学基金(Nos.LGF20F050003, LY18F050007)

第一作者: 叶晓杰(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和图像复原. Email: 13588029671@163.com

导师: 崔光芒(1989-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光电成像优化、光学计算成像. Email: cuigm@hdu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-29; 录用日期: 2020-06-01

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

deblurring restoration algorithm framework to achieve effective acquisition of clear images. A real-time simulation imaging platform for moving objects is built, and experiments of simulation and real-time motion blur restoration are carried out. The experimental results show that the proposed method can better retain the details of the scene, obtain high-quality motion blur restoration results, and effectively improve the negative effects in the restoration process. Compared with other acquisition methods of moving target imaging, the proposed method has better subjective and objective evaluation results.

Key words: Image processing; Image restoration; Fluttering shutter; Motion blurred image; Joint modulation transfer function; Total variation regularization

OCIS Codes: 100.3020; 200.0200; 100.0100; 070.0070

0 引言

在光学系统成像场景图像获取过程中,由于成像传感器未聚焦,或在曝光时间内成像传感器和被拍摄景物之间存在相对运动,或受传感器噪声、大气以及外界光线明暗等因素影响,造成获取图像的质量退化,导致图像模糊^[1-3].其中,运动模糊是成像场景应用中经常遇到的问题,运动目标拍摄过程中,在相机曝光时间内成像目标和相机传感器发生相对运动,导致拍摄场景图像的运动模糊,降低图像分辨率.

图像复原是图像处理中重要的研究方向,也是解决运动模糊问题的有效技术手段.对于运动模糊图像的复原,主要是通过建立运动模糊图像退化方程,再结合具体运动条件约束,开展复原能量方程求解,得到清晰的图像.

近年来,随着运动目标成像探测和模糊图像复原技术的不断发展,研究者们发现在运动模糊图像复原方面利用图像序列开展清晰图像求解,复原结果会优于单帧图像处理的结果.相较于单帧图像对噪声敏感、信息单一等缺点,序列图像复原能够为复原算法框架提供更多的信息,实现图像信息的互补,对图像细节部分的重建起到重要作用.

针对序列图像复原算法,学者们开展了一系列的研究工作.王佩等^[4]基于迭代的最大互补信息序列选帧技术,挑选出最具互补性的多帧模糊图像进行互补复原,复原结果大大优于单帧图像复原.但其通过不同角度的模糊核获得多帧图像,在图像获取过程中对硬件要求较高.何富斌等^[5]设计了通过一组二进制序列来控制相机的快门开闭的方式获取了两帧相邻的图像并进行了联合复原,复原结果有了较好的提升.但是设计的二进制序列只在相机的快门开闭上进行了互补,限制了复原图像的进一步提升.Jeon等^[6]提出了通过一定数量并在一定条件下互补的二进制序列来获取多帧运动模糊图像,结合二进制序列和图像的先验信息,最小化结果能量项进行非盲多帧图像去模糊,使用3组码字开展了仿真和实拍实验,其复原结果得到了一定的提升.此方法尽可能多地保留了图像各个频段上的细节信息,但同时也造成了图像信息的冗余,在降低算法运行效率的同时也对图像复原产生影响.

结合多帧图像复原的优势,本文采用相机闪动快门成像模式获取运动模糊图像,提出了一种基于闪动快门互补序列对的运动模糊图像复原方法.分析了闪动快门成像原理及其码字序列在频域的相关特性,引入Golay互补序列生成理论,构建长度适中的二进制闪动快门互补序列对,互补码字序列的联合调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)相较于与单个码字,其MTF幅值曲线具有更高的最小值和更低的方差值,且互补对码字构成的联合MTF形成了峰值-谷值对应,保证了互补图像序列能够相互补偿由于运动模糊所造成的空间信息损失.在图像复原中结合编码模式引入了全变分(Total Variation, TV)正则化进行互补帧图像的联合复原,得到了主客观评价效果较为优异的复原结果图.

1 相机闪动快门成像

计算成像是近几年发展迅速的一种能够获取高质量图像信息的成像技术,通过对空间、时间、角度等成像场景维度领域进行调制和编码,最终通过计算获取成像重建结果,保留更多的图像细节信息,为传统成像模式下的图像信息重建任务,如去运动模糊、图像超分辨等,提供了新的解决思路.相机闪动快门成像属于计算成像时间维度的一种重要调制成像方式,其在相机曝光过程中通过不断地开闭相机快门进行场景信息获取,有助于保留更多的图像高频信息,其突破了传统图像的局限性,为获取运动场景的清晰图像提供了新的可能.

对于传统曝光成像模式,如图1(a)所示,相机快门在曝光过程中为持续开启状态,相当于在时间域上定义了一个盒装滤波器.从频域角度分析,成像曝光过程定义了一个低通滤波器,同时随着场景中其他噪声的加入,严重破坏了原始图像的重要空间高频信息.同时,快门序列MTF在频域上存在许多零值,使得图像的逆变换成为一个病态性问题.闪动快门成像模式如图1(b)所示,相机快门受二进制码字序列控制,在相机曝光过程中快速打开和关闭.通过控制相机快门的不断闭合,闪动快门成像将曝光序列的MTF频谱图扩展到了更宽的频带,能够保留更多图像高频信息;同时,其在频域幅值曲线中不包含零值,采用逆滤波方法可以直接得到去模糊图像,改善了图像逆变换的病态性问题,极大提高了复原图像的质量^[7-9].

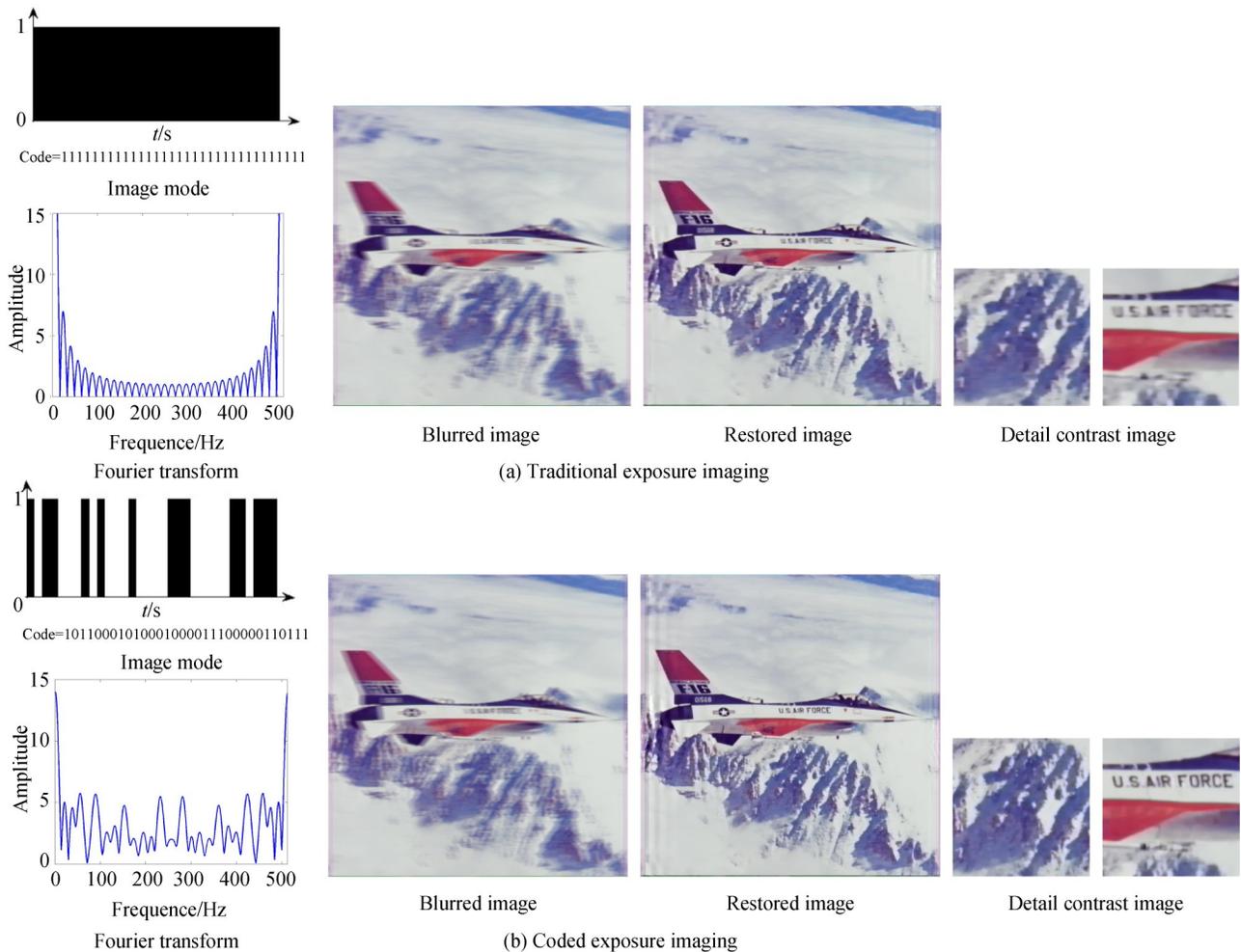


图1 不同成像模式与复原结果对比

Fig. 1 Comparison of different imaging modes and restoration results.

然而,相机闪动快门模式存在一定的缺陷,快门的不断闭合使得获取到的图像信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)降低,且码字的长度以及码字中“1”(表示打开快门)的个数决定曝光时间内获取到的光能量及图像噪声,该因素也影响了成像获取质量.因此选择一个最佳的码字序列对于保证获取的图像能够保留更多的细节信息有着重要作用.研究表明,为获取到最优码字,需要满足条件^[10]:1)码字中“1”的个数适中,以保证足够的光通量;2)码字的MTF曲线不能存在零值;3)码字的MTF曲线存在较小的方差;4)码字的MTF曲线在保证较小的方差时,使得最小值最大.

采用满足上述条件的码字进行实拍实验时,发现由于外界光照以及目标运动速度的影响,采用单幅闪动快门图像进行运动目标获取,不能充分保留图像细节,在快门闭合期间仍会损失部分空间频域信息,单幅闪动快门图像复原质量受到了限制.

2 互补码字序列对

针对单码字序列图像获取和复原效果存在的不足,为了提高闪动快门模式的性能,提出利用一组序列对图像开展运动目标成像获取和去模糊复原,设计闪动快门互补码字序列对,充分利用序列图像之间的信息互补特性,为运动模糊复原提供更多的信息,有助于图像细节的重建.

2.1 互补码字序列理论

互补序列对生成理论已应用于无线数字通信等领域^[11-13].基于闪动快门成像理论,利用Golay序列获取一对长度适中且满足序列要求的互补二进制码字.

Golay互补序列定义为由两种元素构成的长度相等的一组编码序列对,其特征为序列对相关函数和为0,且其功率谱值之和为一常数.同时,Golay互补序列本身存在如下性质:一组序列对中,一个序列按照一定的条件进行分割,其相同元素的对数,必相等于另一序列按同一条件分割产生的不相同元素的对数.设置两种元素为0和1,定义两个序列 $\mathbf{a}=[a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7]=[1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]$, $\mathbf{b}=[b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7]=[1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0]$ 互为Golay互补序列.按照相邻分割原则, \mathbf{a} 序列中有3对相同的元素 a_0a_1, a_1a_2, a_4a_5 , \mathbf{b} 序列中有3对不同的元素 b_2b_3, b_5b_6, b_6b_7 .Golay序列最初由1和-1定义而成,序列对 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的各自自相关函数为

$$\begin{cases} \omega_i^a = \sum_{m=0}^{M-i-1} a_m a_{m+i} \\ \omega_i^b = \sum_{m=0}^{M-i-1} b_m b_{m+i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_i^a, ω_i^b 分别表示序列 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的自相关值, $M-1$ 表示序列长度.其相关函数和表示为

$$\begin{cases} \omega_i^a + \omega_i^b = 0 & i \neq 0 \\ \omega_0^a + \omega_0^b = 2M \end{cases} \quad (2)$$

对应地,序列对 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 的功率谱之和表示为

$$|A_i|^2 + |B_i|^2 = \text{DTF}[\omega_i^a + \omega_i^b] = 2M \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

式中, A_i, B_i 各自表示序列 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的离散傅里叶变换, $\text{DFT}[*]$ 表示离散傅里叶变换操作.

2.2 互补码字序列对的设计

Golay互补序列可以从低阶序列扩展为高级序列并保持其性质不变.通过序列扩展可以得到长度适中的互补序列对.

将基础的Golay序列对构成一个Golay矩阵 \mathbf{X} ,表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, \mathbf{a}, \mathbf{b} 代表长度为 N 的互补序列, \mathbf{X} 为 $2 \times N$ 的矩阵,根据Golay互补序列的性质,对该矩阵进行扩展,得

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \cdot \bar{\mathbf{b}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ 表示将序列 \mathbf{a} 与序列 \mathbf{b} 相连, $\mathbf{a} \cdot \bar{\mathbf{b}}$ 表示将序列 \mathbf{a} 与序列 $\bar{\mathbf{b}}$ 相连; $\bar{\mathbf{b}}$ 表示对序列 \mathbf{b} 进行取反,即若 $\mathbf{b}=[1, 0, 0, 1]$,则 $\bar{\mathbf{b}}=[0, 1, 1, 0]$.

根据上述理论,用一组最基础的互补序列对来构建高级序列,选择 $\mathbf{a}=[1, 1]$, $\mathbf{b}=[1, 0]$,结合式(4)、(5),将基础序列对 \mathbf{a}, \mathbf{b} 构成为32位序列,最终所选取的闪动快门互补序列对表示为

$$\begin{cases} \mathbf{a}=[1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1] \\ \mathbf{b}=[1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0] \end{cases} \quad (6)$$

对于所选取的互补编码曝光序列对,一方面,其中每个序列都满足编码曝光理论成像的码字设计要求,在频域中的MTF曲线都不包含零值,可以采集获取编码曝光图像;另一方面,互补序列对继承了Golay序列互补的特性,帧间图像能够相互补偿由于运动模糊所造成的空间信息损失,在频域实现互补性能,以保证其联合MTF曲线有更好的性能.所选互补序列对的频域MTF曲线及其联合MTF曲线如图2所示.为了能够

更直观地观测曲线,对曲线进行了对数变换,可以看出,联合MTF曲线具有更为平坦的频谱,其最小值大于每个序列的最小值.序列对的互补性能能够在相机闪动快门成像的同时保留更多的目标信息,有助于获得更高质量的去模糊结果.

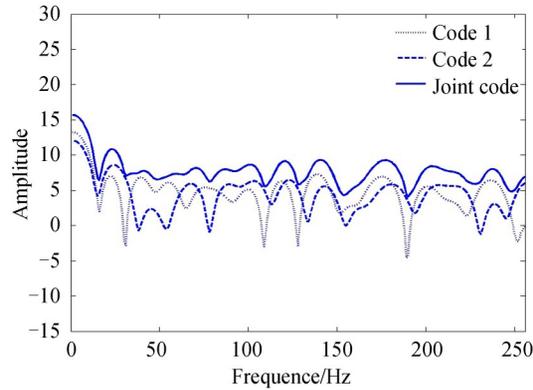


图2 Golay序列对MTF曲线
Fig. 2 MTF curve of Golay sequence pair

3 互补图像联合复原

利用2.2节所设计的互补码字序列,开展多帧运动模糊图像复原,引入全变分TV正则化模型,构造统一的多帧图像去模糊复原算法框架.TV正则化模型最早应用于抑制图像噪声方面,算法不会对图像的像素值的跳变强加平滑作用,在图像复原应用也有很好的效果^[14-16].

通过文献[9]对不同码字下获取的图像进行PSF的估计后,构建基于TV正则化的图像复原能量最优化解方程,即

$$\mathbf{g} = \arg \min \left[\sum_{m=1}^n \frac{\lambda}{2} \|\mathbf{f}_m - \mathbf{h}_m \mathbf{g}\|_2^2 + \text{TV}(\mathbf{g}) \right] \quad (7)$$

式中, \mathbf{f}_m 为拍摄模糊图像, \mathbf{h}_m 为其对应的PSF, \mathbf{g} 代表最终复原图像, $\|\cdot\|_2^2$ 表示2-范数的平方, $\lambda/2$ 表示平滑参数, n 表示输入模糊图像的数量, $m=1,2,\dots,n$,在本文实验中, $n=2$; $\sum_{m=1}^n \frac{\lambda}{2} \|\mathbf{f}_m - \mathbf{h}_m \mathbf{g}\|_2^2$ 为保真项,表示 \mathbf{g} 和 \mathbf{f}_m 的偏离程度; $\text{TV}(\mathbf{g})$ 为正则化项,表示为

$$\text{TV}(\mathbf{g}) = \sum \|D_i \mathbf{g}\|_2 \quad (8)$$

式中, D_i 表示 \mathbf{g} 的水平方向和垂直方向的梯度算子矩阵.

针对式(7)求解最小化优化问题,结合快速TV反卷积算法(Fast TV deconvolution, FTVD)^[17-18]开展复原方程求解.FTVD算法充分利用了复原问题的结构性,能够快速提高算法的收敛速度.通过引入辅助变量 $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}^2$,令

$$\mathbf{y}_i = D_i \mathbf{g} \quad (9)$$

将式(7)转换为

$$(\mathbf{g}, \mathbf{y}) = \arg \min \left[\sum_{m=1}^n \frac{\lambda}{2} \|\mathbf{f}_m - \mathbf{h}_m \mathbf{g}\|_2^2 + \sum_i \|\mathbf{y}_i - D_i \mathbf{g}\|_2 \right] \quad (10)$$

式(10)为可分裂的线性约束问题,应用二次惩罚函数将式(10)转换为

$$(\mathbf{g}, \mathbf{y}) = \arg \min \left[\sum_{m=1}^n \frac{\lambda}{2} \|\mathbf{f}_m - \mathbf{h}_m \mathbf{g}\|_2^2 + \sum_i \left(\|\mathbf{y}_i\|_2 + \frac{\beta}{2} \|\mathbf{y}_i - D_i \mathbf{g}\|_2^2 \right) \right] \quad (11)$$

式中, $\beta \gg 0$ 是二次惩罚参数,当 $\beta \rightarrow \infty$ 时,式(11)的最优解近似式(7)的解.此时,可将关于 \mathbf{g} 的目标函数转换为关于 \mathbf{g} 和 \mathbf{y} 的凸函数.最后采用变量分裂法对式(11)求解,即将变量 \mathbf{g} 和 \mathbf{y} 中的一个变量设置为已知量,求关于另一个变量的极小值会得到其对应的闭合解.

结合多帧图像和全变分正则化模型建立最终目标函数,图像复原问题转化为求解目标函数最小值问题,算法流程如表 1 所示.

表 1 复原算法流程
Table 1 Recovery algorithm flow

Input: $f_1, f_2, h_1, h_2, \lambda > 0$
Output: g
Initial value: order $h = h_1, g \leftarrow f_1, i = 1.$
While “ $i \leq 2$ ”, do
While “Non-convergence”
1) Fixed g , solve y_i by minimization y ;
2) Fixed y , solve g_i by minimization g ;
End do;
1) $i = i + 1$;
End do

结合互补码字序列对生成方法和模糊图像复原方法,整体方案流程如图 3 所示.

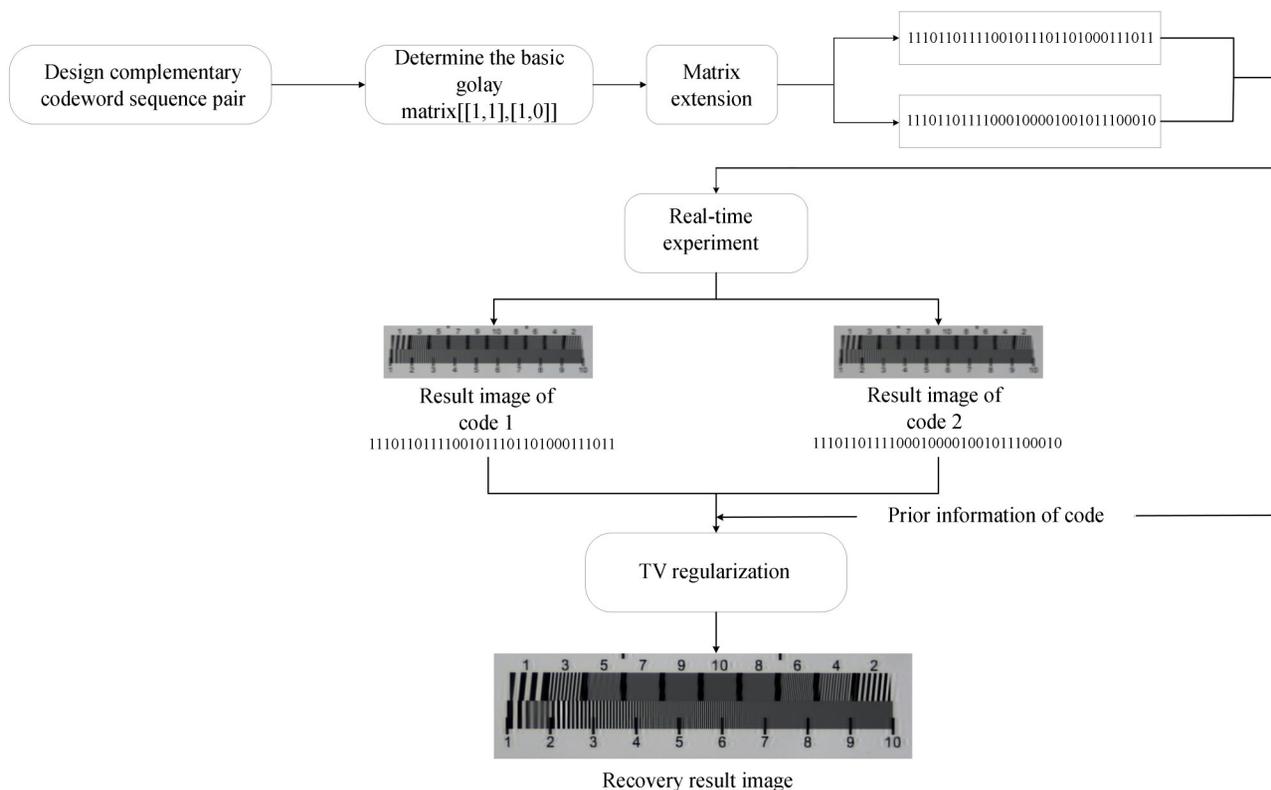


图 3 整体流程
Fig. 3 Overall flow chart

4 实验结果与分析

4.1 实验装置及硬件条件

针对一维方向的匀速运动模糊复原开展了仿真实验和实拍实验.在实验室环境下搭建了运动目标实验仿真平台,如图 4 所示.

相机型号是 Point Gray 系列 FL2-20S4C,其在 Mode5 模式下支持闪动快门成像,相机曝光时间设置为 64 ms,相机拍摄图像为 RGB 三通道彩色图像,像素大小为 1 200×1 600.通过位移台控制导轨匀速运动,其速度可控制在 0~45 mm/s 之间,结合 STM32 单片机开发了闪动快门码字序列发生器,通过 GPIO 数据线实

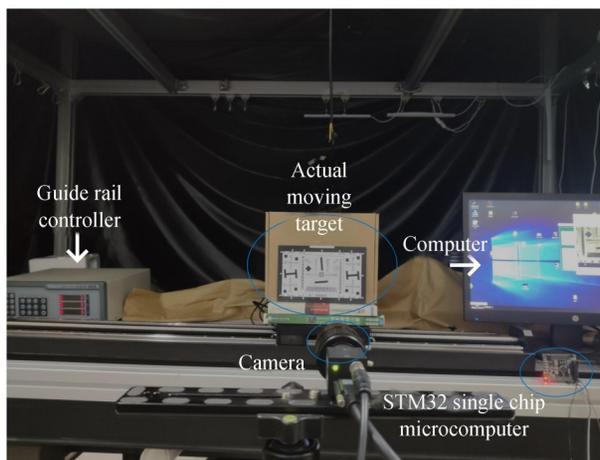


图4 硬件仿真平台实物
Fig. 4 Hardware simulation platform physical figure

现单片机和计算机之间的通信,用 1394b 数据线实现相机与计算机之间的数据传输.实验的计算机硬件环境为 AMD 2600X Six-Core 处理器,主频为 3.60 GHz, MATLAB 2014a 平台,采用 flycapture2 软件控制相机进行拍摄.

4.2 仿真实验对比分析

为了体现所设计的互补码字序列的优势,对比了几种码字序列生成方法,包括闪动快门随机码字序列对,闪动快门对称码字序列对^[5], Jeon 设计的互补码字^[6]和本文互补码字序列对方法,分析了各方法码字序列 MTF 曲线互补特性,结果如图 5 所示.分析图 5 中 MTF 曲线,图 5(a)为随机码字序列对的 MTF 曲线,其

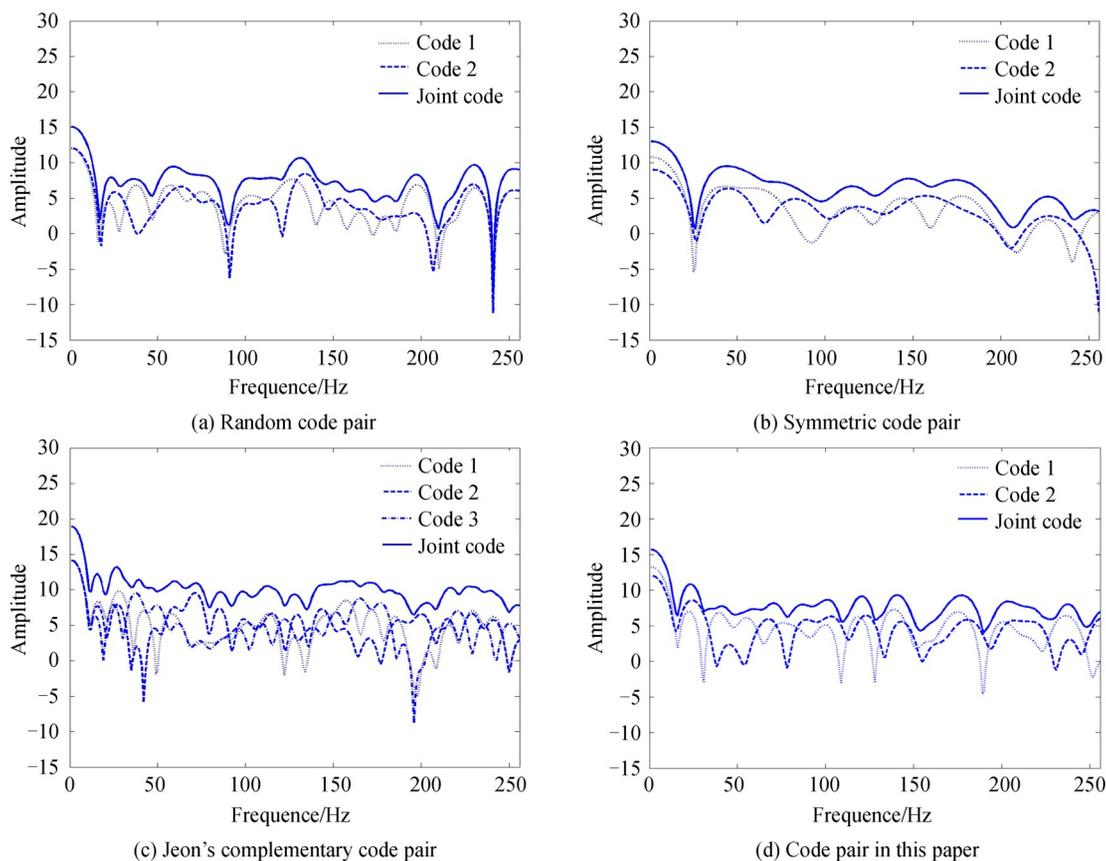


图5 不同组合码字对 MTF 曲线.
Fig. 5 MTF curve of different combination code pairs

码字序列曲线之间未能形成有效的互补特性,且联合MTF曲线波动较大.图5(b)、(c)分别表示对称码字序列对的MTF曲线和Jeon方法下的MTF曲线,其中Jeon的方法中采用了3组码字来实现图像信息的互补,曲线的最小值都得到了一定的提升,但曲线的波动性较大,反映出曲线的互补性不足.图5(d)为本文方法的MTF曲线,分析其联合码字的MTF曲线变化,曲线较为平坦,最小值同时得到了提升,且存在良好的互补性.

图5中不同方法码字序列对的联合MTF曲线的客观评价数据如表2所示,本文方法联合MTF具有更大的MTF曲线最小值和更小的MTF方差值,表示互补码字联合MTF具有更好的频域信息保持特性,体现了本文方法的优势.

表2 联合MTF曲线最小值和方差
Table 2 Minimum value and variance of combined MTF curve

Method	Random code pair	Symmetric code pair	Jeon's complementary code pair	Proposed code pair
MIN	-8.15	-4.4	3.52	4.04
VAR	6.83	8.03	6.45	3.72

为了验证算法的稳定性和实用性,从LIVE数据库(LIVE Wild Compressed Picture Quality Database)中,选取了10幅图像作为仿真复原实验的数据,如图6所示.引入了结构相似度(Structural Similarity Index Metrics, SSIM)和图像信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)两种客观图像质量评价指标,定量分析复原结果的质量.

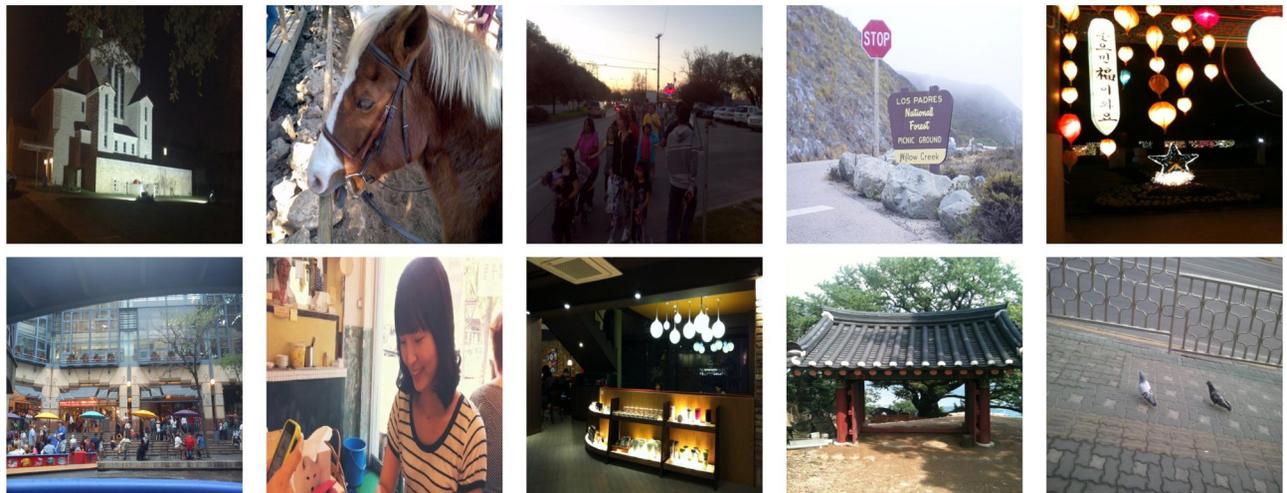


图6 LIVE数据库图
Fig. 6 Images from LIVE database

对于图6所选的10幅图像,分别在传统曝光成像模式、随机编码曝光序列对成像模式、对称编码曝光序列对成像模式、Jeon's互补编码曝光序列对成像模式和本文互补编码曝光序列对成像模式下,开展运动模糊复原仿真对比.各组图像的复原结果SSIM和SNR评价结果如图7所示.

从图7评价结果可以看到,相比于传统成像模式下的运动模糊复原,四种闪动快门成像模式都有更优的复原图像质量,体现了闪动快门成像模式对于场景信息能够更好地保留.而对比闪动快门四种码字序列对方法,随机码字序列对由于未考虑任何图像获取过程中的信息互补特性设计,其SSIM和SNR评价数值都表现得不理想;对称码字序列对设计了一定的信息互补准则,复原质量有所提升,但由于其对称码字中没有做到“0”和“1”的匹配,导致获取的模糊图像中光照差异性较大,一定程度影响了图像的复原结果;Jeon等设计的互补码字使用了3组码字,在复原过程中由于信息的冗余,影响了最终的图像复原结果.本文所设计的互补码字对运动模糊复原方法在拍摄过程中保留了更多的信息,并将其引入到复原处理算法中,拍摄获取图像对相互补偿由于运动模糊所造成的空间信息损失,复原图像结果具有最优的客观评价表现.

以LIVE数据库中1幅图像复原结果为例,展示各对比方法的复原结果,如图8所示.图8(a)为传统曝光

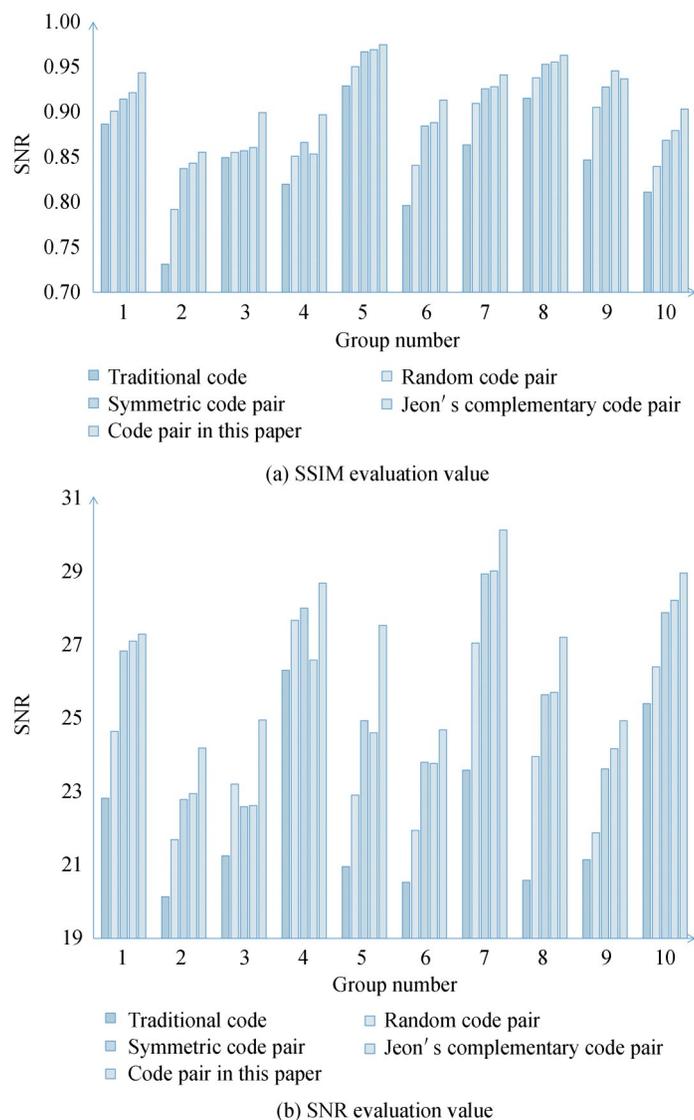


图7 不同图像在不同成像模式下复原的客观评价

Fig. 7 The objective evaluation of different images restored under different imaging modes.

模式的复原结果,图像边缘有明显的振铃,且图像分辨率没有较好地提升;图8(b)为随机码字序列对模式下的运动模糊复原结果,在引入了相机闪动快门模式后,相较于传统曝光模式,模糊图像较多地保留了图像细节信息,但是由于码字对为随机选取,没有一定的互补性,复原效果依然欠佳,且会造成一定的信息的冗余;图8(c)为对称码字序列对模式下的复原结果,相较于图8(b),复原结果质量有所改善,但依然未充分利用到图像之间的信息互补,存在细节部分复原精度不高的问题;图8(d)为Jeon等的互补码字序列模式下的复原结果,其在码字选取中选用了3组码字,由于信息的冗余,在减低复原效率的同时也对复原图像有一定的影响;图8(e)为本文互补码字序列对模式下的复原结果,其利用了互补码字对使得获取的图像对之间存在大量信息互补,成像过程中信息损失量最小化,极大地提高了复原精度,从局部放大结果来看,图像分辨率得到了显著的改善和提升,复原效果最佳。

图8中不同方法的客观评价结果如表3所示,本文方法具有更好的客观评价指标,与主观评价结果一致。同时本方法下的复原效率能够较为实时地显示复原结果。

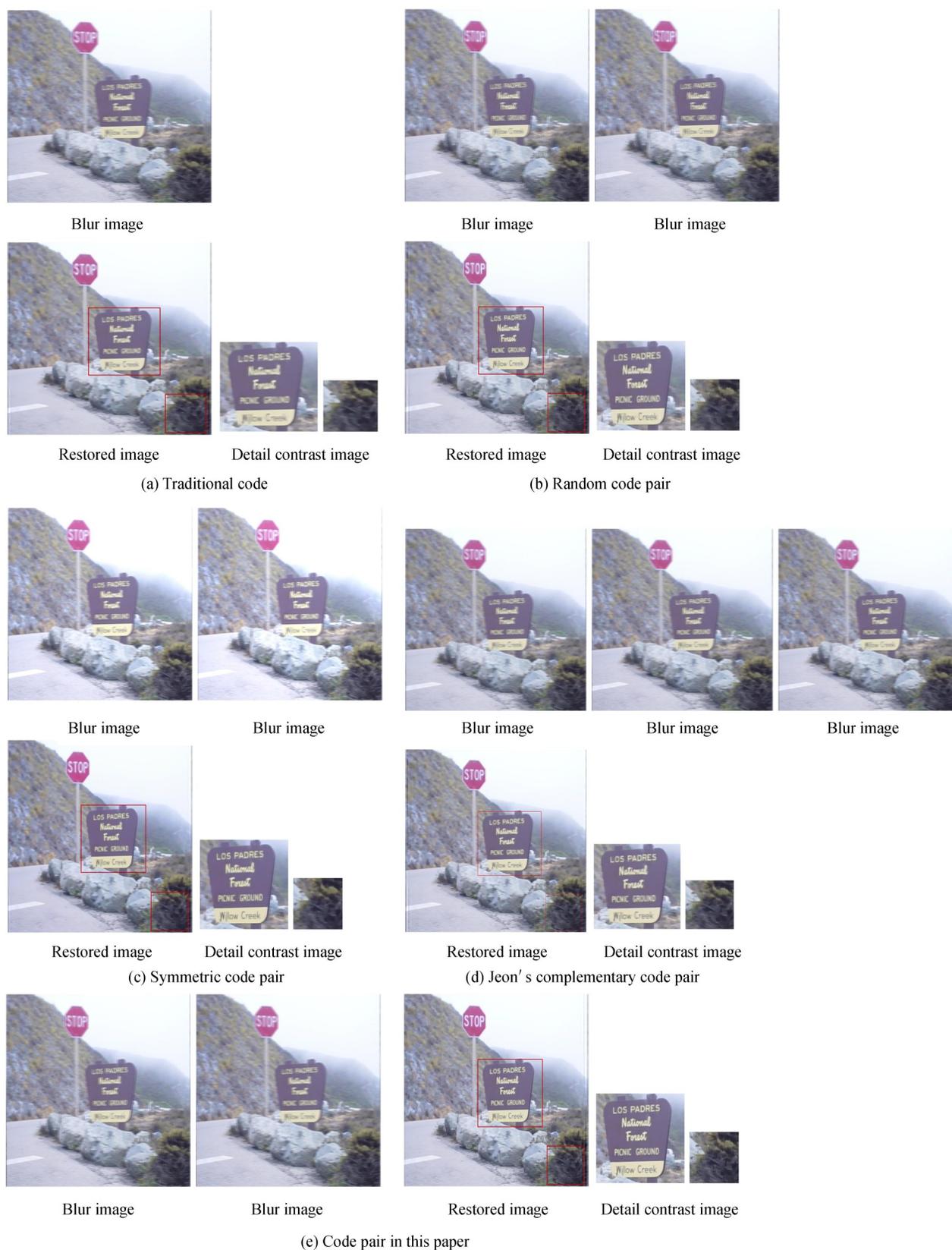


图 8 不同码字模式下的复原仿真
Fig.8 Restoration simulation under different code modes

表3 不同码字模式下仿真复原的客观评价
Table 3 Objective evaluation of simulation restoration in different code modes

Method	Traditional code	Random code pair	Symmetric code pair	Jeon's complementary code pair	Proposed code pair
SSIM	0.819 7	0.850 8	0.866 1	0.853 3	0.896 7
SNR	26.276 7	27.631 2	27.961 2	26.551 3	28.640 8
Time/s	0.52		1.2	21.9	1.2

4.3 实拍复原结果分析

为了进一步验证本文方法,利用搭建的实验平台进行实拍实验.通过导轨运动模拟真实场景的相对运动,并将设计好的互补序列对通过单片机传输到相机中拍摄序列图像.成像目标固定在运动导轨平台上随导轨以相同速度运动.分别针对靶图和标签图场景开展运动模糊图像获取及复原实验,复原结果和局部区域的放大图如图9和10所示.

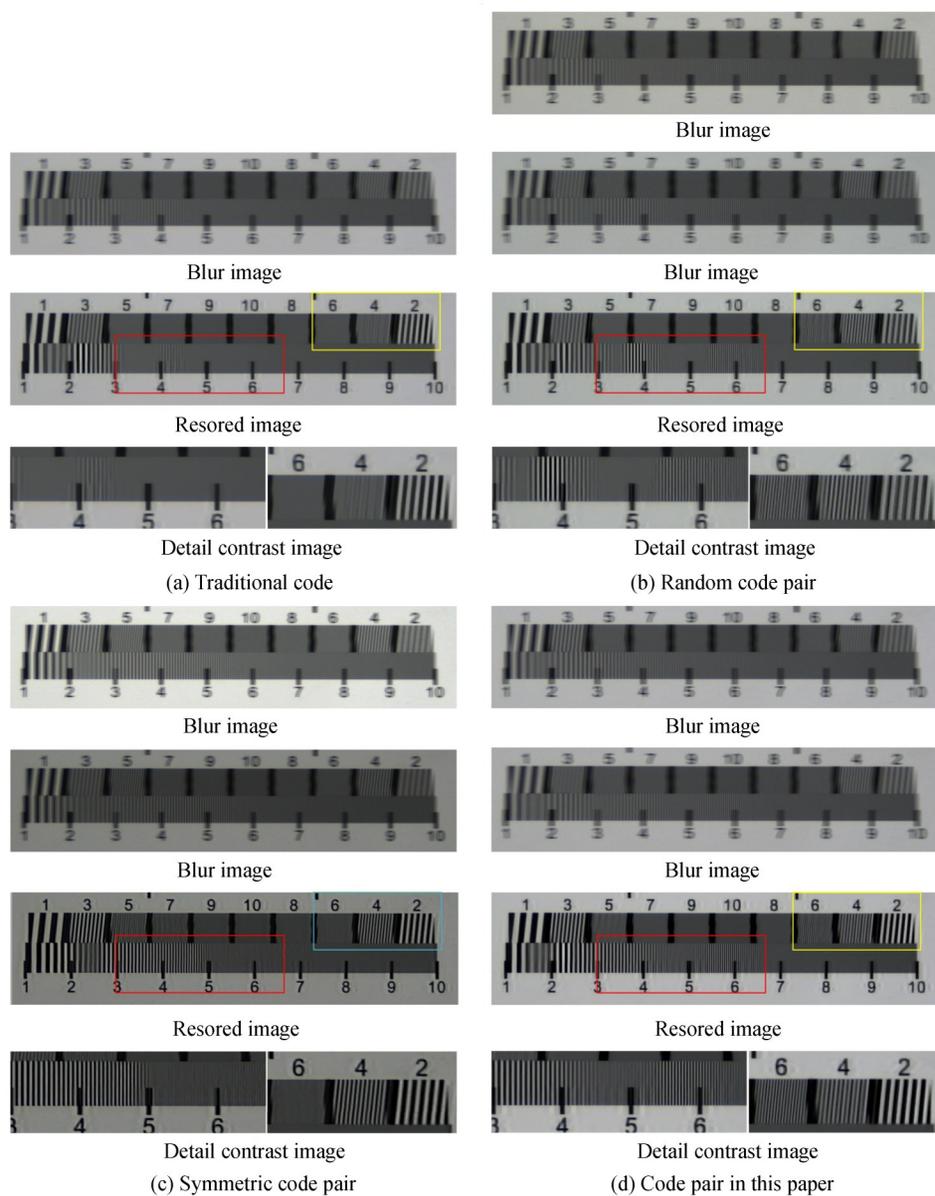


图9 不同码字模式下标靶图像复原比较
Fig.9 Comparison of target image restoration under different code modes



图 10 不同码字模式下标签牌图像复原比较

Fig. 10 Comparison of signboard image restoration under different code modes

图 9 为分辨率板标靶图复原结果. 分析不同成像模式结果可以看到, 传统曝光模式下模糊图像的细节信息保存较少, 闪动快门模式下的模糊图像能够保留更多的图像信息, 几种闪动快门成像复原结果均优于传统曝光模式. 图 9(b) 随机码字序列对模式, 在一定程度上能够复原出空间频率较高的区域, 但由于未考虑序列图像间的空间信息互补特性, 复原结果还是丢失了部分细节, 未能很好地复原出图像的纹理信息; 图 9(c) 对称码字序列对模式, 通过相反对称的码字序列对设计, 图像序列间补偿了一些空间频域损失, 但由于其互

补码字设计较为粗糙,信息互补能力有限;对于图9(d)中本文互补码字序列对模式拍摄的模糊图像对及复原结果,标靶图像清晰度得到了较大的改善,人眼可分辨黑白线对等级显著提高,反映了复原算法对于场景分辨能力的提升具有很好的表现,其主观视觉分辨率的提高明显优于其他成像获取模式。

图9对比结果的客观图像质量评价数据如表4所示,分别给出了不同成像方案复原结果的SSIM和SNR两种评价指标数值.从表4数据结果看出,本文提出的方法相对于其他方法在SSIM和SNR两种指标上都取得了较好的效果。

表4 不同码字模式下标靶图像复原的客观评价

Table 4 Objective evaluation of target image restoration under different code modes

Method	Traditional code	Random code pair	Symmetric code pair	Proposed code pair
SSIM	0.723 6	0.760 8	0.825 4	0.896 3
SNR	19.754 3	20.283 1	17.197 7	22.490 5

图10为标签牌场景复原结果,从中挑选出细节丰富的部分进行对比实验.为了能够更直观清晰地分析不同方案的复原效果,将复原结果中红色方框的细节丰富区域分割成两部分并放大显示,主要对比关注放大细节区域中下方小字细节部分的复原表现.分析图10可知,针对实际场景成像探测应用,外界噪声其他条件等因素会影响成像图像的质量,对复原图像带来更多不稳定性的挑战.如传统成像模式复原结果会出现振铃和噪声负效应,对称码字序列对获取图像曝光量不正确等.相比其他几种复原方案,本文方法在提高图像分辨率以及抑制图像振铃等方面有更好的主观视觉评价表现,对于小字细节部分的信噪比和清晰度有很好的改善和提升效果.图10对比结果的客观评价数据如表5所示.同样可知,本文方法表现更优,具有主客观一致性的复原结果表现。

表5 不同码字模式下标签牌图像复原的客观评价

Table 5 Objective evaluation of signboard image restoration under different code modes

Method	Traditional code	Random code pair	Symmetric code pair	Proposed code pair
SSIM	0.860 8	0.883 7	0.899 2	0.920 6
SNR	19.824 1	21.684 1	15.224 5	22.229 2

为了验证本文算法针对一些典型目标运动模糊图像的复原效果,对舰船模型目标进行了仿真实验,图11为舰船模型清晰图像,同样针对细节部分图像进行对比试验,如图12所示.该组实验模糊图像像移量约为20个像素,复原结果显著改善了由于相对运动造成的图像分辨率下降,在去除噪声的同时复原目标图像细节信息,复原结果质量较好.图12结果对应的SSIM和SNR评价结果和提升指标数值如表6所示.可以看到,针对典型目标的运动模糊复原结果,SSIM指标提升19.8%,局部SNR指标提升34.9%,进一步证明了本文算法的有效性。



图11 典型运动目标部分清晰图像

Fig. 11 A part of clear images of typical moving objects

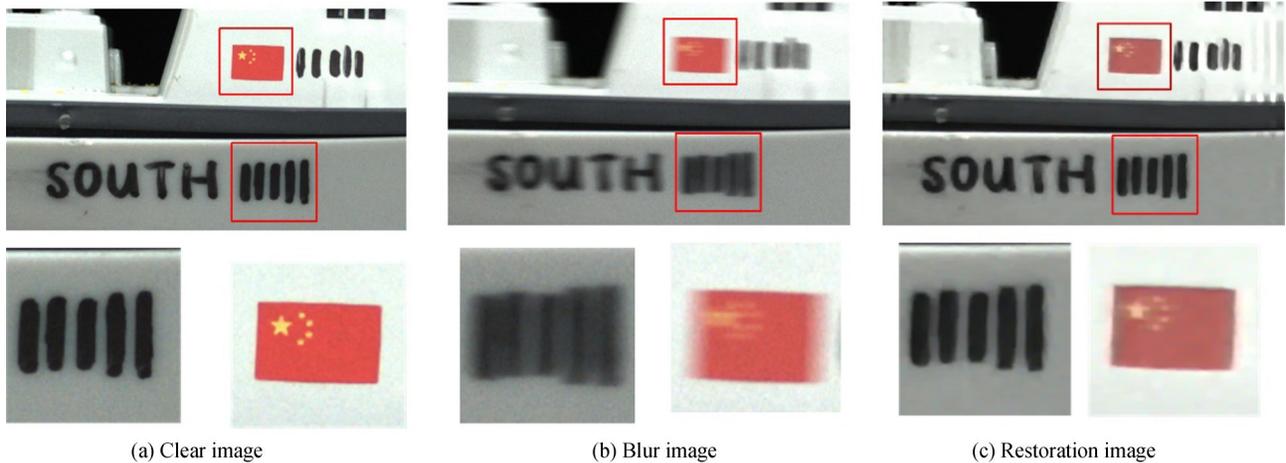


图12 典型运动目标复原结果及局部区域放大展示

Fig. 12 Restoration results of typical moving objects and enlarged display of local areas

表6 图12的客观评价提升指标

Table 6 Improvement value of evaluation index of restoration results in Fig.12

Evaluation method	Blurred image	The results of this method	Improve index rate
SSIM	0.787 9	0.943 9	19.8%
SNR	19.936 1	26.895 7	34.9%

5 结论

本文提出了一种基于闪动快门互补序列对的运动模糊图像复原的方法.采用了相机闪动快门模式采集图像,分析相机闪动编码成像、码字的构建以及序列图像之间图像信息互补的原理,采用Golay基础序列构建了长度适中的二进制互补序列对,互补对码字中联合MTF相较于单个码字的MTF,具有更小的方差值和更大的最小值,且互补对码字构成的MTF曲线中形成峰值-谷值对应,使得形成的联合MTF曲线更为平坦,保证在空间域中获取的模糊图像对间能够实现信息互补.在图像复原中引入了全变分正则化思想进行互补帧图像的联合复原.实验结果表明,该方法能够获得更高质量的模糊图像及其复原图像,具有更好的主客观评价.目前本文算法在仿真和一定的实拍场景中已取得了较好的结果,下一步工作将扩展该复原框架,运用到更多的实际场景中.同时,结合深度学习来进一步提高图像的复原质量.

参考文献

- [1] JAVARAN T A, HASSANPOUR H, ABOLGHAEMI V. Blind motion image deblurring using an effective blur kernel prior[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, **78**(16): 22555-22574.
- [2] LIU Gui-xiong, WANG Bo-di, HUANG Jian, *et al.* Research progress and prospect on image motion deblurring[J]. *Laser Journal*, 2019, **40**(4): 1-8.
刘桂雄,王博帝,黄坚,等.运动模糊图像复原技术研究进展与展望[J].激光杂志, 2019, **40**(4): 1-8.
- [3] BAO S J. Motion blur image restoration algorithm based on the theory of reaction diffusion[C]. International Conference on Mechanical, Electronic and Information Technology(ICMEIT), 2018: 311-316.
- [4] 王珮,孙瑾秋,李海森,等.基于互补性的运动模糊图像复原方法[EB/OL].北京:中国科技论文在线[2017-05-02].
<http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201705-94>.
- [5] HE Fu-bin. Research on motion deblurring method for encoding exposure image [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
何富斌.码曝光图像的运动去模糊方法研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [6] 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.
- [7] WU Qiong, SUN Shao-jie, LI Guo-hui. Blind restoration method of ghosting blurred image based on shutter coding model [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011, **40**(2): 283-287.
吴琼,孙韶杰,李国辉.快门编码模型重影模糊图像盲复原方法[J].电子科技大学学报, 2011, **40**(2): 283-287.
- [8] RASKAR R, AGRAWAL A, TUMBLIN J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter[J].

ACM Transactions on Graphics, 2006, **25**(3): 795-804.

- [9] CUI Guang-mang, YU Kuai-kuai, YE Xiao-jie, *et al.* Searching method for optimal code sequence of coded exposure based on Memetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(3): 0311004.
崔光芒,于快快,叶晓杰,等.基于Memetic算法的编码曝光最优码字序列搜索方法[J].光学学报,2019,**39**(3): 0311004.
- [10] HE Li-rong, HUANG Jia-zi, FENG Hua-jun, *et al.* Fast image restoration method based on flutter detection and coded exposure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(9): 0910003.
何丽蓉,黄加紫,冯华君,等.基于颤振探测和编码曝光的快速图像复原方法[J].光学学报,2014,**34**(9): 0910003.
- [11] LIU D, GU J, HITOMI Y, *et al.* Efficient space-time sampling with pixel-wise coded exposure for high-speed imaging [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **36**(2): 248-260.
- [12] HUANG X, LI Y. Scalable complete complementary sets of sequences [C]. Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM'02. IEEE, 2002, **2**: 1056-1060.
- [13] KALASHNIKOV E. An introduction to Golay complementary sequences[J]. *Eureka*, 2014, **4**(1): 40-48.
- [14] DEY N, BLANC-FERAUD L, ZIMMER C, *et al.* Richardson-Lucy algorithm with total variation regularization for 3D confocal microscope deconvolution[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2006, **69**(4): 260-266.
- [15] WERLBERGER M, POCK T, BISCHOF H. Motion estimation with non-local total variation regularization [C]. 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2010: 2464-2471.
- [16] ALLARD W K. Total variation regularization for image denoising, I. Geometric theory [J]. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 2008, **39**(4): 1150-1190.
- [17] WANG Y, YANG J, YIN W, *et al.* A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction[J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2008, **1**(3): 248-272.
- [18] WANG Jing, LÜ Ke, HE Ning, *et al.* Total variation image de blur based on split Bregman method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012,**40**(8): 1503-1508.
王静,吕科,何宁等.基于分裂Bregman方法的全变差图像去模糊[J].电子学报,2012,**40**(8):1503-1508.