

考虑 CCD 噪声条件下的编码曝光最优码字搜索方法*

黄魁华, 张 军, 徐树奎, 李国辉

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 编码曝光技术将病态的运动模糊图像复原问题转化为良态问题, 寻找最优码字是编码曝光技术的关键。面向实用化目的, 提出了一种考虑 CCD 传感器噪声的编码曝光相机最优码字搜索方法。基于仿射噪声模型对图像成像过程中的噪声成分进行了系统分析, 首次从理论上分析了 Raskar 码字选取依据并基于复原图像信噪比增益提出了光子噪声对最优码字构造影响的解析表达式。在对实际编码曝光相机进行噪声标定的基础上, 提出了最优码字搜索的准则并构造出适应度函数, 采用遗传算法进行优化搜索得到最优码字。仿真图像和真实图像的复原结果证实了该方法的有效性, 复原图像信噪比得到有效的提高。

关键词: 编码曝光; 运动模糊复原; 光子噪声; 最优码字

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)06-0072-07

Searching for the optimal code of coded exposure photography in the presence of CCD noise

HUANG Kuihua, ZHANG Jun, XU Shukai, LI Guohui

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Coded exposure photography makes the ill-posed motion deblurring problem well-posed, and searching for the optimal code has been the key problem in coded exposure photography. For practical purpose, an optimal code searching method for coded exposure photography in the presence of CCD sensor noise is proposed. Firstly, the sensor noise in the process of imaging was systemically analyzed based on the affine noise model. Then, the basis of Raskar's code was theoretically analyzed for the first time and based on the signal to noise ratio (SNR) gain of deblurred image, an analytic formulas between the photon noise and the structure of the optimal code was presented. Finally, based on the noise calibration of real coded exposure camera, the criteria for the optimal code was presented, a fitness function was designed and the optimal code using the genetic algorithm was obtained. Experimental results with synthetic and real data demonstrates the validity of the proposed method.

Key words: coded exposure; motion deblurring; photon noise; optimal code

当相机与被拍摄场景在曝光时间内存在相对运动时, 获取的图像就会出现运动模糊。图像运动模糊包括相机抖动模糊和物体运动模糊。近来, 由于图像盲复原方法的突破^[1-3], 相机抖动模糊图像复原取得了比较理想的效果。由于运动模糊图像模糊尺度较大, 且一般表现为局部图像区域的模糊, 图像盲复原方法的复原效果不够理想。

针对传统的运动模糊图像复原问题的病态性, Raskar 等^[4]提出了一种基于编码曝光(Coded Exposure, CE)的图像拍摄方法。编码曝光技术作为计算摄影^[5-6]的具体应用, 其核心思想是在相机曝光期间根据预先设计的二进制编码序列(称为码字)快速地开-关相机快门以保留高频信息。与在曝光期间快门一直处于打开状态的传统相机不同, 编码曝光相机的点扩展函数是宽带滤

波器, 其傅里叶变换频谱不含零点, 编码曝光图像的运动模糊复原可以采用快速的直接反卷积方法来获取清晰图像, 其点扩展函数是可逆的。由此, 编码曝光技术将病态的模糊图像复原问题转化为良态问题。

寻找控制相机快门的最优码字是编码曝光技术的关键问题。研究者们已经做了许多卓有成效的工作。Raskar 等^[4]采用随机线性搜索的方法得到一个近似最优的码字, 并且首次提出了选取编码曝光相机最优码字的两条标准。Agrawal 和 Xu 同时考虑点扩展函数的可逆性和易估计性提出了一种寻找最优码字的方法^[7]。Agrawal 等^[8]随后研究了一种针对运动去模糊的图像最优获取策略问题, 从实验的角度探讨了编码曝光码字构造对图像恢复结果的影响。McCloskey 证明了最优码字依赖于

* 收稿日期: 2012-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902093, 61170159); 国防科技大学优秀研究生创新基金资助项目(S080501)

作者简介: 黄魁华(1986—), 男, 安徽砀山人, 博士研究生, E-mail: kuihh@163.com;

李国辉(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: guohli@nudt.edu.cn

被拍摄物体的运动速度,并提出了一种速度依赖的最优码字搜索方法^[9],同时探讨了编码曝光相机的读出噪声(Readout noise)和激发脉冲次数的关系,提出在编码曝光相机获取图像过程中应使用尽量少的激发脉冲次数以减少读出噪声。

编码曝光模式下 CCD 传感器噪声比较严重,从实用化的角度出发,在寻找最优码字时需要充分考虑传感器噪声的影响。已有的最优码字搜索方法多是考虑读出噪声^[4,9],却忽视了光子噪声(Photon noise)对于复原图像质量的影响。对于现代的传感器系统,即使在低光照条件下,光子噪声依然是传感器噪声组成的重要成分^[10]。本文以提高复原图像的信噪比为目的,首先基于仿射噪声模型系统分析了编码曝光相机的传感器噪声成分;其次给出了光子噪声条件下最优码字和复原图像信噪比增益关系的解析表达式,并对真实的编码曝光相机进行了噪声标定;针对已有的码字搜索方法多采用近似穷极搜索,时间效率低的缺点,本文最后提出了寻找最优码字的适应度函数,并采用遗传算法搜索编码曝光相机的最优码字。

1 CCD 传感器噪声分析

本文采用适合现代传感器系统的仿射噪声模型^[11]对编码曝光图像的噪声组成进行分析。仿射噪声模型将图像噪声分为信号相关噪声和信号非相关噪声两部分。信号非相关噪声主要包括暗电流噪声、读出噪声和 ADC 噪声,而信号相关噪声则是指光子噪声。

CCD 图像传感器是采集系统的核心部件,它负责将光学信号转化为电信号,完成光电转换。CCD 传感器的工作原理如图 1 所示。由于光的波动性,即使对于理想情况下的恒定环境光,光子通量也是一个随机变量,而光电转化过程本身也是一个随机过程。一般地,CCD 收集的光生电荷数 $n_{\text{electr}}^{\text{photo}}$ 服从泊松分布^[12]。

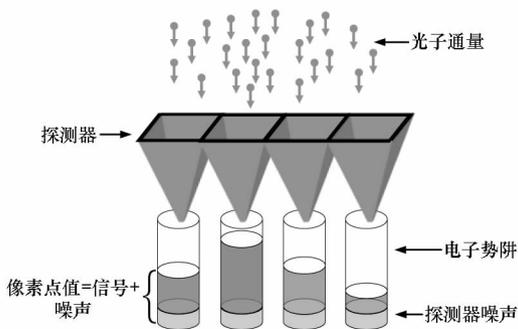


图 1 CCD 传感器光电转化原理图

Fig. 1 Photon-electron transform in CCD sensor

因为 $n_{\text{electr}}^{\text{photo}}$ 服从泊松分布,则 $n_{\text{electr}}^{\text{photo}}$ 的方差:

$$\text{VAR}(n_{\text{electr}}^{\text{photo}}) = \varepsilon(n_{\text{electr}}^{\text{photo}}) \quad (1)$$

式中, ε 为随机变量的期望。因此,方差随着电信号 $n_{\text{electr}}^{\text{photo}}$ 线性增长,这个方差就为光子噪声。光子噪声的存在是和相机质量无关的,因为它来自于光的量子特性,是信号相关的量^[12]。光生电荷数和获取图像的像素值 I 是成正比的:

$$I = n_{\text{electr}}^{\text{photo}} / Q_{\text{electr}} \quad (2)$$

这里 Q_{electr} 代表改变一个单位灰度级所需要的光生电荷数,一般情况下 $Q_{\text{electr}} \gg 1$ 。结合式(1)、(2),可以得到光子噪声方差:

$$\varepsilon(n_{\text{electr}}^{\text{photo}}) / Q_{\text{electr}}^2 = I / Q_{\text{electr}} \quad (3)$$

CCD 传感器内部由于热激励会产生自由电荷,和光生电荷无法区分被作为正常电荷输出而产生暗电流(Dark current)。即使在完全无光照的环境下,暗电流依然存在。暗电流噪声的期望可以表征为

$$\varepsilon(n_{\text{electr}}^{\text{dark}}) = Dt \quad (4)$$

式中, D 为传感器暗电流系数, t 为图像获取时间。暗电流噪声也服从泊松分布^[13],其方差等于期望。以灰度值为单位,暗电流噪声方差为 Dt / Q_{electr}^2 。

附加噪声主要包括放大器读出噪声(Amplifier readout noise)和模数转换噪声(ADC noise)。都是信号非相关噪声,仅与相机系统电子器件的电路有关。附加噪声方差可表示为 σ_a^2 。

光子噪声、暗电流噪声和附加噪声是相互独立的随机变量,输出图像总噪声方差可表示为

$$\sigma_i^2 = \kappa_{\text{gray}}^2 + I / Q_{\text{electr}} \quad (5)$$

式中 $\kappa_{\text{gray}}^2 = Dt / Q_{\text{electr}}^2 + \sigma_a^2$,表示信号非相关噪声。

暗电流噪声在需要长时间曝光的图像中是一种重要的噪声成分,在曝光时间低于 1s 的应用中一般忽略不计^[14],所以本文将信号非相关噪声 κ_{gray}^2 看作和曝光时间无关的一个常量。

对于编码曝光图像成像过程,码字中每个码元所对应的快门开启或关闭时间是相等的,则对于特定长度的码字,式(5)可以写成

$$\sigma_i^2 = \kappa_{\text{gray}}^2 + C\eta^2 \quad (6)$$

式中 η^2 为单个码元“1”对应的快门开启状态下传感器光子噪声方差, C 为码字中“1”的个数。

2 光子噪声条件下最优码字选取

2.1 无光子噪声条件下最优码字选取

Raskar 等^[4]提出了两条搜索编码曝光最优码字的准则,且通过实验给出一个近似最优的码

字(以下称“Raskar 码字”),该码字中“1”和“0”比例各占 50%,下面将通过理论分析指出这种码字只在不考虑光子噪声的条件下才能达到最优。

对于水平方向上的匀速直线运动,图像运动模糊可以表示为向量乘积的形式^[15]:

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f} + \mathbf{N} \quad (7)$$

式中 \mathbf{H} 为模糊矩阵,为一维的循环矩阵, \mathbf{g} 、 \mathbf{f} 和 \mathbf{N} 分别表示模糊图像、清晰图像以及图像噪声的列向量。假设复原图像为 $\hat{\mathbf{f}}$,则 $\hat{\mathbf{f}}$ 的协方差矩阵可以表示为

$$\Sigma = \varepsilon\{[\mathbf{W} - \varepsilon(\hat{\mathbf{f}})][\hat{\mathbf{f}} - \varepsilon(\hat{\mathbf{f}})]^T\} = \sigma_f^2(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1} \quad (8)$$

由上式,复原图像 $\hat{\mathbf{f}}$ 的均方误差 (Mean Square Error, MSE) 可以表示为

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\text{Trace}(\Sigma) = \frac{\sigma_f^2}{n}\text{Trace}[(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}] \quad (9)$$

式中 $\text{Trace}(\cdot)$ 表示求取矩阵的迹, n 为图像的水平宽度。

在图像模糊复原领域,经常用 MSE 来衡量重建图像的质量,MSE 越小,则复原图像的质量越好。对于特定长度的码字,在不考虑光子噪声的情况下,由式(6)可知,图像噪声方差 σ_f^2 为一常量,则最小化式(9)等价于最小化 $\text{Trace}[(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}]$ 。Ratner 等在研究多路光照技术^[12]时给出了此类问题的解析表达式,Cossairt 指出其同样适用于编码曝光技术^[14]:

$$T_{\min}(C) = \min\{\text{Trace}[(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}]\} \\ = \frac{(N-C) + C(N-1)^2}{(N-C)C^2} \quad (10)$$

这里 N 代表码字长度, C 代表码字中“1”的个数。对于给定长度的码字,为求出使复原图像 MSE 最小的最优码字中“1”的个数,式(10)对 C 求导,得到

$$\frac{\partial T_{\min}}{\partial C} = -\frac{2}{C^3} - \frac{(N-2C)(N-1)^2}{(NC-C^2)^2} \quad (11)$$

将式(11)置零,可得到无光子噪声条件下码字中最优的“1”的个数为

$$C_{\text{opt}}^{\text{free}} = \frac{N^2 - 2N - 3 \pm (N-1)\sqrt{(N^2 - 2N + 9)}}{4N - 8} \quad (12)$$

因 $C_{\text{opt}}^{\text{free}}$ 为正整数,经过简单数值分析^[12],可得

$$C_{\text{opt}}^{\text{free}} = \lceil \frac{N}{2} \rceil \quad (13)$$

Raskar 码字和式(13)的结论是一致的,码字中“1”的个数正好等于码字长度的一半。可见,

在不考虑光子噪声的情况下,Raskar 码字是最优的。但是对于现代传感器系统来说,即使在光照条件比较暗的情况下,光子噪声依然是不可避免的。从实用化的角度考虑,研究光子噪声条件下最优码字的选取问题有很大的现实意义。

2.2 光子噪声对最优码字构造的影响

为了方便表达码字中“1”的个数对于复原图像信噪比的影响,本文定义两个基本概念。

定义 1 短曝光图像 编码曝光图像对应的短曝光图像是指曝光时间仅为该编码曝光图像获取时间 $1/N$ 的图像,即码字中单个码元所对应的曝光时间内获取的图像。

定义 2 信噪比增益 信噪比增益定义为编码曝光复原图像信噪比和短曝光复原图像信噪比之比。

可见,信噪比增益可以用来衡量编码曝光复原图像信噪比的提高。

编码曝光复原图像的信噪比可以表示为

$$\text{SNR}_{CE} = \frac{\bar{I}_0 t}{\sqrt{\text{Trace}[(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}]/n} \sqrt{\kappa_{\text{gray}}^2 + C\eta^2}} \quad (14)$$

式中 \bar{I}_0 为相机单位曝光时间获取图像的平均强度, t 为曝光时间,分母为复原图像均方根误差。由于短曝光图像曝光时间为 t/C ,且此时矩阵 \mathbf{H} 为单位矩阵,则短曝光复原图像信噪比可表示为

$$\text{SNR}_{SE} = \frac{\bar{I}_0 t/C}{\sqrt{\kappa_{\text{gray}}^2 + \eta^2}} \quad (15)$$

结合式(14)、(15),可以得到编码曝光复原图像的信噪比增益为

$$Q = \text{SNR}_{CE}/\text{SNR}_{SE} = C \sqrt{\frac{n}{\text{Trace}[(\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}]}} \sqrt{\frac{1 + \chi^2}{1 + C\chi^2}} \quad (16)$$

其中 $\chi^2 = \eta^2/\kappa_{\text{gray}}^2$,这里称作相机系统特征因子。由于 κ_{gray}^2 是常量, χ^2 实际反映了光子噪声水平。本文设定码字长度 $N=52$,采用 Agrawal 提供的码字搜索代码得到 25 个码字,其中“1”的个数从 2 递增到 26,设定 $n=256$,图 2 给出了 χ^2 取值为 0、0.045 和 0.225 时信噪比增益的取值情况及曲线拟合结果。从拟合曲线可以看出,当 $\chi^2=0$,即无光子噪声影响时, $C \approx 26$ 取得最优的信噪比增益;而当 $\chi^2=0.225$ 时, $C \approx 14$ 时才能取得最优的信噪比增益。可见,在考虑光子噪声的影响时,编码曝光最优码字中“1”的个数不再是码字长度的一半,而要取更小的值,而 Raskar 码字是在不考虑光子噪声下的一种特殊情况。

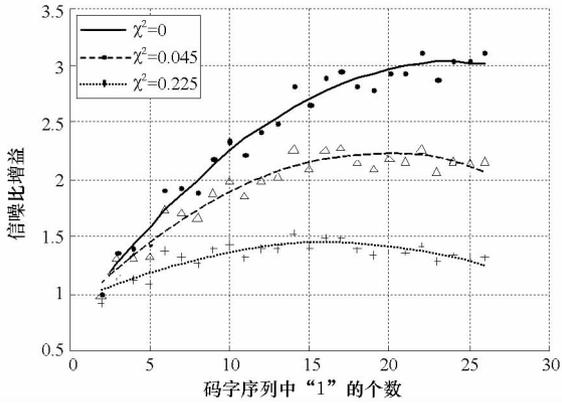


图2 不同光子噪声强度下信噪比增益和码字中“1”的个数关系

Fig.2 Relationship between SNR gain and the number of “1” in the code at different photon noise level

2.3 噪声标定

在选择最优码字时要考虑光子噪声的影响,首先要对相机系统进行噪声标定,以得到相机系统特征因子 χ^2 的值。本文采用文献[16]的CCD传感器噪声标定方法。对均匀光照条件下光反射系数基本相同的平面(实验装置如图6(e)所示),利用2.2节中得到的25个码字拍摄得到25组大小为 $m \times n$ 的RAW格式编码曝光图像,每组包含2幅图像,分别标记为 $I_1(x, y, C)$ 和 $I_2(x, y, C)$,这里 x, y 为像素坐标, C 为该组图像对应的码字中“1”的个数,令

$$I_{\Delta}(x, y, C) = I_1(x, y, C) - I_2(x, y, C) \quad (17)$$

由 $I_1(x, y, C)$ 和 $I_2(x, y, C)$ 相互独立可知, $I_{\Delta}(x, y, C)$ 的方差为 $2\sigma_I^2$,则每一个码字拍摄的图像方差可以表示为

$$\sigma_{I_{\Delta}}^2(C) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{1 \leq x \leq m} \sum_{1 \leq y \leq n} (I_{\Delta}(x, y, C) - \mu_{\Delta}(C))^2 \quad (18)$$

其中 $\mu_{\Delta}(C)$ 为 $I_{\Delta}(x, y, C)$ 的样本均值, $M = m \times n$ 为图像总的像素数。图3中散点是本文噪声标定的真实数据,直线是利用式(6)直线拟合的结果,通过直线拟合得出 η^2 和 κ_{gray}^2 的估计值分别为0.0845和0.2936,由此得出 $\chi^2 = 0.2878$ 。

3 基于遗传算法的最优码字选取

为提高效率且不以大幅度压缩搜索空间^[4,7]为代价,考虑到码字为二进制码的特点,采用遗传算法进行最优码字的搜索。遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。它的非遍历搜索机制可以迅速收敛到全局近似最优解,大大提升了搜索算法的效率。

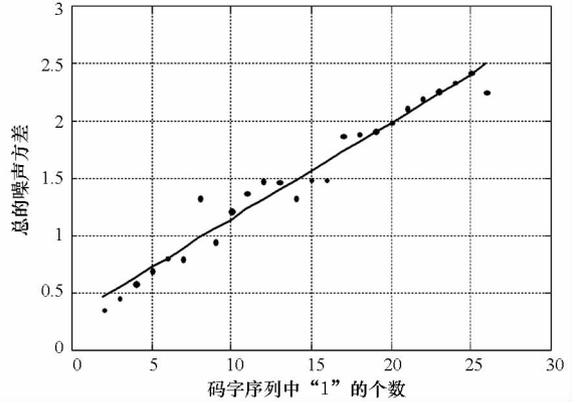


图3 噪声标定及直线拟合结果

Fig.3 Noise calibration and line fitting result

3.1 适应度函数

选择合适的适应度函数是遗传算法设计的关键问题。Raskar最早提出了两条搜索最优码字的准则,即最大-最小准则和方差最小准则^[4]。本文在充分考虑光子噪声影响的情况下,把复原图像的信噪比增益作为其中一项重要的准则,以约束码字中“1”的个数。

基于最大-最小准则的方法在全频率空间平等对待码字傅里叶变换能量谱,寻找使能量谱最小值最大的码字为最优。自然图像的能量谱分布并不是均匀的,而是大部分能量集中在低频部分。为了进一步提高复原图像的信噪比,本文算法赋予码字频谱低频部分更大的权重,而赋予高频部分较小的权重^[17]。至此,本文定义适应度函数为

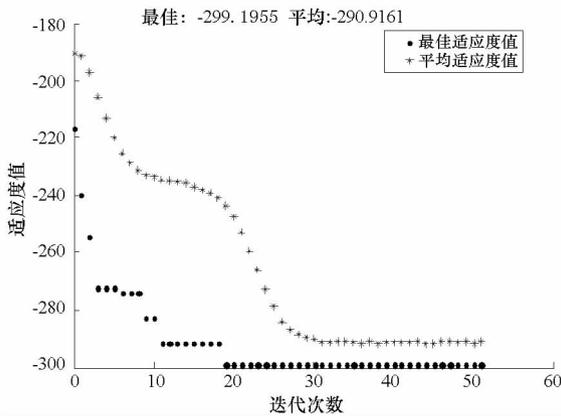
$$\text{fitness} = -\omega_1 \min(|\hat{S}(k)|) + \omega_2 \text{var}(|\hat{S}(k)|) - \omega_3 Q - \omega_4 \text{mean}\left(\frac{|\hat{S}(k)|}{k+1}\right) \quad (19)$$

其中, $|\hat{S}(k)|$ 为码字傅里叶变换频谱,上式前两项为Raskar提出的准则; Q 为信噪比增益;最后一项是为了提升低频部分的优先级。加权系数可以通过线性回归的方法获得,但比较耗时。本文采用实验的方法,首先通过调整加权系数将上面四项调整到一个数量级上,然后针对不同的码字长度,采用遗传算法搜索,将得到的码字频谱和Raskar方法得到的码字频谱进行比较,然后不断地微调各项权重的值,确定取值为: $\omega_1 = 3000$, $\omega_2 = 1000$, $\omega_3 = 60$, $\omega_4 = 10000$ 。

3.2 最优码字搜索

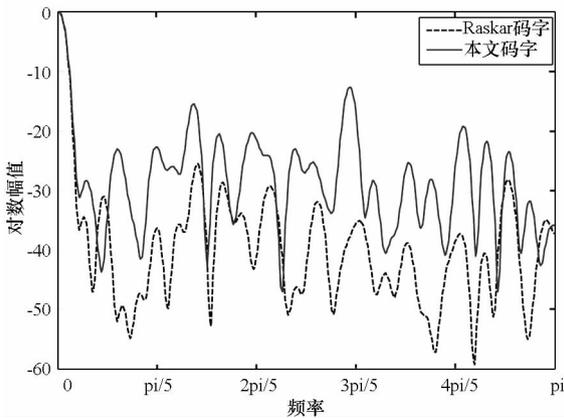
文中初始种群大小设置为100个体,为了进一步增加算法收敛速度,设置初始个体中“1”的个数占码字长度的一半。遗传算法是在选择、交叉和变异三种算子的作用下完成的。文中三种算

子直接采用 Matlab 工具箱中的算法,初始交叉概率和变异概率分别设置为 80% 和 1%。为了减少搜索时间同时防止种群早熟,在遗传算法的搜索过程中,如果最好个体的适应度值超过 5 代仍然没有提高,那么交叉概率和变异概率则分别提高 1% 和 0.5%。算法的终止条件设定为:当遗传算法的迭代次数等于最大迭代次数,或者变异率大于 8.5%,本算法的最大迭代次数设定为 50 代。经过遗传算法搜索,本文选取的 $N = 52$ 最优码字为 1000000100000010000001100000000110100110001000000001。图 4(a) 为本文遗传算法适应度值收敛过程,图 4(b) 为本文码字和 Raskar 码字频谱对数幅值曲线对比。



(a) 遗传算法搜索过程

(a) Searching process of genetic algorithm



(b) 两种码字傅里叶频谱对数幅值曲线

(b) Log magnitude of DFT value of two codes

图 4 最优码字搜索过程

Fig. 4 Searching process of the optimal code

4 实验结果与分析

实验机配置为 2.81G Hz AMD Athlon 双核处理器,2G DDR3 RAM 的 PC 机,实验平台为 Matlab 2009。

4.1 仿真图像复原

这里采用文献[8]提供的图像序列来仿真运动物体的编码曝光图像并进行图像的复原。该图像序列是采用帧率为 1000fps 的高速摄像机拍摄一个匀速直线运动的物体而得到。经过手动标定,每帧图像中物体移动 0.2769 像素。用高速视频帧仿真编码曝光图像的方法为:在码字中码元为“1”的位置加入对应位置的特定数量的连续视频帧,然后求取平均得到一幅编码曝光图像。例如对于 3.2 节中本文码字,如果每个“1”加入两帧图像(第一个“1”对应图像序列第 1、2 帧,第二个“1”对应图像序列第 15、16 帧,以此类推),则生成一幅模糊尺度为 29 个像素的编码曝光图像,如图 5(a) 所示。同理,文中采用 Raskar 码字生成图 5(b) 所示的编码曝光图像。图 5(c) 为相同模糊尺度的传统曝光图像。图 5(d) 为利用本文点扩展函数的复原结果,图 5(e) 为 Raskar 的点扩展函数的复原结果。图 5(f) 为应用 QiShan 的图像盲复原方法对图 5(c) 的复原结果。图 5(g) ~ (i) 分别是图 5(d) ~ (f) 对应的局部放大图像。可以看出,采用本文码字得到的编码曝光图像其复原图像在视觉质量上得到较大的提升,降低了噪声水平,而图 5(d) 的复原结果有较为明显的噪声影响。QiShan 方法是目前公认的优秀的图像盲复原方法,但用于模糊尺度较大的运动模糊图像复原时依然会产生比较严重的振铃效应,且由于其反卷积使用了循环迭代的方法,运行效率相对较低。QiShan 方法复原结果如图 5(f) 所示。视觉质量上,图 5(d) 和图 5(e) 都要优于图 5(f),这也说明了编码曝光技术更加适用于大尺度的运动模糊图像复原。表 1 列出了三种方法下复原图像信噪比和运行时间,编码曝光图像复原可以采用直接反卷积的方法,速度很快,故表 1 中前两种方法运行时间主要是码字搜索时间。从表中可以看出,本文方法取得了理想的信噪比的提高,且由于应用了遗传算法进行最优搜索,算法运行效率得到了很大的提升。

表 1 信噪比及时间效率对比

Tab. 1 SNR of deblurred image and the running time

	本文方法	Raskar 方法	QiShan 方法
运行时间(s)	12.532	54.8368	56
信噪比(dB)	22.8019	20.6819	18.7087

4.2 真实图像复原

本文采用 PointGrey 公司^[18]的 Flea2 系列相机作为编码曝光相机,该相机电子快门支持分次

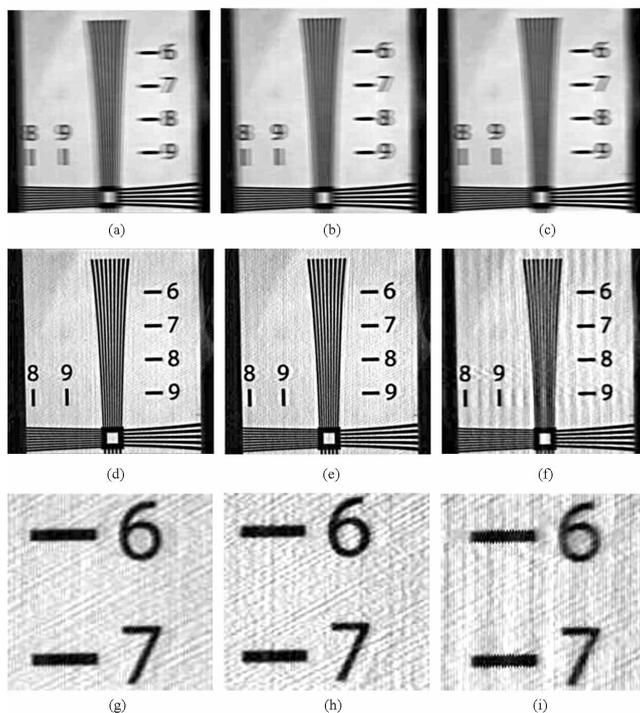


图5 仿真编码曝光图像复原实验

Fig. 5 Motion deblurring of synthetic code exposure image

曝光脉冲宽度模式,可以编程实现编码曝光功能。Flea2 相机支持软件触发方式,但为了提高触发信号的时间精度,本文采用了 Arduino Duemilanove 系列微控制器为 Flea2 相机提供外部触发信号,以完成编码曝光过程^[19],实验装置如图 6(e) 所示,拍摄目标为一个可以控制速度的玩具火车模型。分别采用本文码字以及 Raskar 码字拍摄了两幅真实编码曝光图像,图像中物体在相机焦平面内做匀速直线运动。图 6(a) 为使用本文码字拍摄的图像,图 6(b) 为使用 Raskar 码字拍摄的图像。经手动标定,图 6(a) 中物体模糊尺度为 108 个像素,图 6(b) 中物体模糊尺度为 106 个像素。两种码字拍摄的运动模糊图像都采用 Raskar 提供的直接反卷积方法进行图像复原。Raskar 码字将“1”的个数固定为码字长度的一半,没有考虑场景光强,即没有考虑光子噪声的影响,复原图像的信噪比难以达到理想的水平。本文码字在噪声标定的基础上通过遗传算法优化搜索得到,充分考虑了光子噪声的影响,更加符合实际,复原图像信噪比能够得到有效提高。本文码字和 Raskar 码字复原结果分别如图 6(c) 和图 6(d) 所示。图 6(f) 从上至下分别为图 6(c)、图 6(d) 以及静止拍摄的图像局部放大图。从视觉质量上,可以比较明显地看出,本文码字拍摄的图像复原结果噪声更少,图像也更清晰。表 2 列出了本文码字和 Raskar 码字得到的复原图像信噪比,本文方法获

得的复原图像信噪比得到了有效的改善。

表 2 真实图像复原结果信噪比对比

Tab. 2 SNR of deblurred result for real coded exposure image

	本文方法	Raskar 方法
信噪比 (dB)	14.5907	11.1881

5 结论

本文研究了考虑 CCD 传感器噪声条件下编码曝光相机的最优码字选取问题。文中基于仿射噪声模型对 CCD 传感器获取的图像噪声成分进行了比较完整的分析,并基于此噪声模型着重分析了光子噪声对于编码曝光相机最优码字选取的影响。本文指出在考虑光子噪声的条件下,编码曝光最优码字中“1”的个数不再是整个序列长度的一半,并基于对复原图像信噪比增益的分析,给出了光子噪声和最优码字中“1”的个数关系的解析表达式。文中对实际的编码曝光相机进行了噪声标定,得到了反映光子噪声水平的相机系统特征因子。在此基础上,本文提出了搜索最优码字的准则并构造出适应度函数,采用遗传算法进行优化搜索。仿真和真实图像都验证了本文方法得到的复原图像信噪比更高,视觉质量也更好,更加贴近实用化的目的。下一步的工作将集中在两个方面:(1)对编码曝光图像模糊尺度进行自动估计;(2)研究其他运动形式下(如匀加速、钟摆运



图 6 真实编码曝光图像复原实验及实验环境

Fig. 6 Motion deblurring of real coded exposure image and the experimental setup

动等)编码曝光图像点扩展函数估计问题。

参考文献 (References)

[1] Levin A. Blind motion deblurring using image statistics [C]// Neural Information Processing Systems, 2006.

[2] Fergus R, Singh B, Hertzmann A, et al. Removing camera shake from a single photograph [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006,25(3):787 – 794.

[3] Shan Q, Jia J, Agarwala A. High-quality motion deblurring from a single image [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008,27(3):1 – 10.

[4] Raskar R, Agrawal A, Tumblin J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006,25(3):795 – 804.

[5] Raskar R, Tumblin J, Mohan A, et al. Computational photography [C]//EUROGRAPHICS, 2006.

[6] Suo J L, Ji X Y, Dai Q H. An overview of computational photography [J]. Science China, 2012,55(6).

[7] 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, 2009:2066 – 2073.

[8] Agrawal A, Raskar R. Optimal single image capture for motion deblurring [C]//Proceedings of IEEE Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009.

[9] McCloskey S. Velocity-dependent shutter sequences for motion deblurring [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision, 2010.

[10] Wuttig A. Optimal transformations for optical multiplex measurements in the presence of photon noise [J]. Applied Optics, 2005,44(14):2710 – 2719.

[11] Liu C, Szeliski R, Kang S B, et al. Automatic estimation and

removal of noise from a single image [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008,30(2): 299 – 314.

[12] Ratner N, Schechner Y Y, Goldberg F. Optimal multiplexed sensing: bounds, conditions and a graph theory link [J]. Optics Express, 2007,15(25).

[13] Schechner Y Y, Nayar S K, Bellhumeur P N. Multiplexing for optimal lighting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007,29(8):1339 – 1354.

[14] Cossairt O. Tradeoffs and limits in computational imaging [D]. Columbia University, 2011.

[15] 邹谋炎. 反卷积和信号复原 [M]. 北京:国防工业出版社, 2001.

ZOU Mouyan. Deconvolution and signal recovery [M]. Beijing: National defense industry Press, 2004. (in Chinese)

[16] Healey G, Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(3):267 – 276, 1994.

[17] McCloskey S, Yuanyuan D, Jingyi Y. Design and estimation of coded exposure point spread functions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, preprint at 2012.

[18] Point Grey camera [EB/OL]. [2011 – 12 – 05]. <http://www.ptgrey.com>.

[19] 徐树奎, 张军, 涂丹, 等. 基于混合编码曝光的匀加速运动模糊图像复原方法 [J]. 国防科技大学学报, 2011,33(6): 78 – 83.

XU Shukui, ZHANG Jun, TU Dan, et al. A constant acceleration motion blur image deblurring based on hybrid coded exposure [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(6): 78 – 83. (in Chinese)