

快门编码模型重影模糊图像盲复原方法

吴琼¹, 孙韶杰², 李国辉²

(1. 空军军训器材研究所 北京 海淀区 100195; 2. 国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

【摘要】针对刑侦取证工作中经常出现的一种重影模糊图像, 提出了一种快门编码模型来近似模拟重影模糊的本质, 利用快门编码模型对重影模糊图像进行盲复原处理。实验结果表明了该快门编码模型对复原重影模糊图像的合理性, 对实际拍摄的重影模糊图像, 该算法能够有效地复原出模糊图像中的感兴趣信息, 具有较高的实用性。

关键词 图像盲复原; 快门编码模型; 刑侦取证; 重影模糊

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.025

Blind Deconvolution Algorithm for Overlap-Blurred Images Based on Coded-Shutter Model

WU Qiong¹, SUN Shao-jie², and LI Guo-hui²

(1. Airforce Training Equipment Institute Haidian Beijing 100195;

2. College of Information System and Management, National University of Defense Technology Changsha 410073)

Abstract A coded-shutter model is proposed to approximate the nature of overlap-blur, which often arises in the criminal detection forensics work. A blind image deconvolution algorithm is designed based on the coded-shutter model. The experiment results show that when tested on the real overlap-blurred photographs, the proposed algorithm can restore the information of interest in the blurred images effectively.

Key words blind image deconvolution; coded-shutter model; criminal detection forensic; overlap-blurred image

随着数字技术的飞速发展, 在刑事侦查工作中利用数字成像设备收集案件线索进行取证的情况越来越多。然而, 由于取证现场的外部环境复杂多变, 尤其是当突发性取证或是刑侦人员与取证目标存在高速相对运动时, 采集到的数字图像的质量往往不尽如人意, 糟糕的图像视觉效果甚至会妨碍对案件的侦破。刑侦工作中常见的一种图像降质现象是重影模糊。为此, 如何增强数字取证图像的质量, 尤其是提高对感兴趣目标(如车牌)的识别率, 更好地服务于刑侦工作, 越来越受到国家相关安全部门的关注。

在只有模糊图像已知的情况下, 要求恢复出成像过程中丢失的细节信息, 即图像盲复原问题, 一直是图像处理领域的研究热点和难点之一。至今, 已提出了诸多的盲复原方法^[1-2]。

对于重影模糊图像, 应用现有的图像盲复原算法均较难得到可令人眼识别的效果。因此, 为了复原刑侦取证工作中经常出现的重影模糊图像, 本文提出了一种快门编码模型, 用于近似模拟重影模糊

的本质, 并设计了一种图像盲复原算法, 首次尝试利用该快门编码模型对重影模糊图像进行盲复原处理。

1 重影模糊图像盲复原算法

图1为重影模糊图像示例图。



a. 实际拍摄图像



b. 车牌区的放大图

图1 重影模糊图像示例

图 1b 是图 1a 中车牌区域的放大图, 车牌已无法辨认, 存在重影现象。将该类模糊称之为“重影模糊”。

1.1 快门编码模型

在多数实际情况中, 图像的模糊过程可以通过卷积^[3]描述为:

$$g = f \otimes h + n \quad (1)$$

式中, f 和 g 分别表示原始的未模糊图像和模糊图像; h 表示点扩散函数(point spread function, PSF); n 表示噪声; \otimes 表示卷积。根据 PSF 的已知性, 可将图像复原分类为非盲图像复原和图像盲复原。非盲图像复原假设 PSF 已知, 而图像盲复原中 PSF 和原始图像都是未知的, 所以盲复原问题的病态性更加严重, 难以解决。

模糊图像盲复原的关键和难点在于点扩散函数的估计。重影模糊的成因之一是在曝光瞬间由于相机与目标之间存在高速的相对运动, 是一种运动模糊。而运动模糊通常是将点扩散函数建模为匀速直线运动模型, 以水平方向为例, 其模型为:

$$h(x, y) = \begin{cases} 0 & y \neq 0, -\infty \leq x \leq \infty \\ \frac{1}{d} & y = 0, 0 \leq x \leq d \end{cases} \quad (2)$$

式中, d 为模糊的长度。

本文通过一个实验来验证上述匀速直线运动模型对重影模糊是否有效。假设在曝光瞬间一个白色目标在黑色背景前从左向右运动, 令模糊长度为 8 pixel, 按照式(2)的匀速直线运动模型, 结果如图 2 所示。



图 2 匀速直线运动模型实验结果图

由图 2 可知, 模糊图像中并未出现重影的现象, 从而说明了匀速直线运动模型不能表示出重影模糊的本质。因此, 本文尝试建立一种新的模型来近似重影模糊图像的成像原理, 并在此基础上估计出点扩散函数, 实现重影模糊图像的复原。

众所周知, 一次成像过程是在曝光时间内从相机快门打开开始到快门关闭结束, 即快门的一开一关的一组动作即可形成一个影像。同理, 若需形成多个影像, 则快门应完成相应次数的开关动作组合。而观察重影模糊图像(如图1b)发现, 虽然由于模糊产生了虚影, 但仍可以认为目标出现了两个或两个以上的影像, 尤其从单独的一个子目标(如号码“3”)

能够更加清楚地分辨出多个影像, 这也正是重影模糊的特点。

为了更好地近似模拟重影模糊的成像原理, 本文假设在一次曝光时间内, 相机快门可以完成多次的开关动作组合。以一次曝光时间内快门完成两次开关动作组合为例进行说明, 如图3所示。令相机开始曝光时刻为 t_0 , 一次曝光的时间总长度为 T_0 , 相机在 t_0 时刻打开快门, 经过 t_1 单位时间 ($0 < t_1 < T_0$), 在 $t_0 + t_1$ 时刻快门关闭; 然后经过 t_2 单位时间 ($0 < t_1 + t_2 < T_0$), 在 $t_0 + t_1 + t_2$ 时刻再次打开快门, 直到曝光结束, 即在 $t_0 + T_0$ 时刻关闭快门。

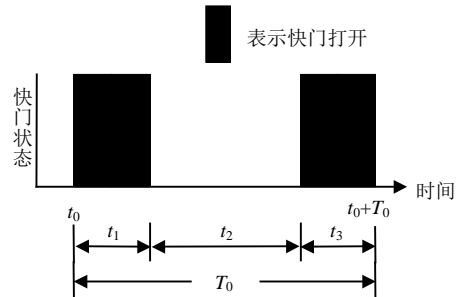


图 3 快门完成两次开关动作组合示意图

快门在每个单位时间内的状态可以用“1”或“0”表示, “1”表示打开, “0”表示关闭, 相机快门在整个曝光时间内的状态就可以用一个二进制的序列来表示。图 3 中的快门状态可以用下面的二进制序列表示为:

$$\underbrace{11\dots100\dots0}_{t_1} \underbrace{11\dots1}_{t_2} \underbrace{11\dots1}_{t_3} \quad (3)$$

用二进制序列表示快门开或关的状态, 称为“快门编码”, 而对应的二进制序列称为“码字”。

相机一次曝光的时间一般都较短, 在更短的子时间段(如图 3 中的 t_1 和 t_3)内, 目标的运动可以认为是匀速直线运动, 因此, 在子时间段内的模糊所对应的点扩散函数符合匀速直线运动模型。假设在整个曝光时间内模糊的总长度为 k_0 个像素, 简单起见, 令 $k_0 = T_0$, 保证在一个单位时间内的模糊长度为 1 pixel, 在 $k_0 = T_0$ 的条件约束下, 图 3 中对应的点扩散函数与上述二进制序列(或码字)有着密切的联系, 即点扩散函数可以表示为:

$$\frac{1}{t_1 + t_3} \times \underbrace{[11\dots100\dots0]}_{t_1} \underbrace{[11\dots1]}_{t_2} \underbrace{[11\dots1]}_{t_3} \quad (4)$$

如图3所示, 相机快门在一次曝光时间内已经完成了两次开关动作组合, 因此形成两个影像。通过实验进行说明, 与图2实验类似, 假设在曝光瞬间一个白色目标在黑色背景前从左向右运动。不妨令

$T_0=8, t_1=2, t_2=4, t_3=2, k_0=8$, 则相机快门的状态所对应的二进制序列为“11000011”, 由于 $k_0=T_0=8$, 所以点扩散函数为 $1/4 \times [1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1]$ 。实验结果如图4所示。



图4 快门编码模型实验结果图

观察图4可知, 模糊图像中出现了重影现象, 快门的两次开关动作组合正好形成了两个重影。虽然传统数码相机在一次曝光时间内快门只完成一次开关组合, 但是对图1、图2和图4中的模糊情况进行比较可以发现, 本文提出的“快门编码”能够近似地表示重影模糊的本质, 为重影模糊图像的复原提供了一个有效的思路。

图3仅仅给出了快门编码模型的一种特例, 为不失一般性, 快门编码模型描述如下:

对于给定的一段有限的曝光时间 T , 将其均匀分割成 m 个子时间段, 则每一个子时间段的长度为 T/m 。使用“1”或“0”表示每个子时间段内相机快门的状态, “1”表示打开, “0”表示关闭, 则相机在整个曝光时间内的开或关的状态所对应的的码字 C (即二进制序列)为:

$$C = c_1 c_2 \cdots c_i \cdots c_m$$

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{快门打开} \\ 0, & \text{快门关闭} \end{cases} \quad 1 \leq i \leq m \quad (5)$$

假设运动目标在每个子时间段内是匀速直线运动, 在整个曝光时间 T 内, 沿目标运动方向的模糊总长度为 k 个像素, 为保证在每个子时间段内模糊的长度为 1 pixel, 需对模糊图像进行相应的缩放, 缩放系数为:

$$d = \frac{m}{k} \quad (6)$$

若模糊长度 k 大于子时间段的总数 m (也是码字的长度), 则需要以系数 d 对模糊图像进行缩小; 反之, 需要以系数 d 对模糊图像进行放大。经过相应的缩放操作后, 整个曝光时间内的模糊所对应的点扩散函数 PSF 为:

$$\text{PSF} = \frac{1}{s} [c_1 c_2 \cdots c_i \cdots c_m] \quad 1 \leq i \leq m \quad (7)$$

式中, c_i 的取值与式(5)中 c_i 的取值完全一致; s 为码字 C 中“1”的总个数; m 为码字的长度。

1.2 图像盲复原

观察图4的实验及生成的模糊图像, 假设点扩散

函数PSF的长度(即码字的长度)为 m (以 pixel 为单位), 则曝光结束后坐标为 (u, v) 的像素点将会沿运动方向一直模糊到坐标为 $(u, v+m-1)$ 的位置, 假设原始未模糊目标在沿运动方向上的长度为 n , 则在同一方向上模糊目标的总长度变成了 $n+m-1$, 图像复原的目标则要从 $n+m-1$ 个观测像素中估计目标的 n 个真实像素的最优值。

由以上可知, 快门编码模型可以较为有效地模拟重影模糊的本质, 在该模型的基础上, 只要知道重影模糊对应的码字, 根据式(7)推导出点扩散函数 PSF, 在 PSF 已知的情况下, 利用非盲复原方法即可完成重影模糊图像的复原。根据快门编码模型可知, 重影模糊图像复原的关键是对码字的选择以及对模糊长度和方向的估计, 参数的选择详见 2.1 节。快门编码模型是一种一维模型, 只适用于水平方向的模糊, 在实际应用中, 对于非水平方向模糊的重影图像, 首先根据模糊方向将图像运动调整到水平方向, 然后根据式(6)确定的系数对图像进行缩放, 再利用式(7)将码字转换成点扩散函数 PSF, 使用非盲复原算法(如 Richard-Lucy(RL)算法^[4-5]和最小二乘法^[6])等进行图像恢复, 最后再将复原结果图像进行相应的反缩放, 至此就完成了重影模糊图像的复原。

2 实验结果及分析

2.1 参数选择与算法有效性分析

对码字的确定和模糊长度的估计是本文算法的关键之一, 为此本文通过下面的实验对码字和模糊长度的选取与算法的有效性进行相关分析。

以“Cameraman”标准测试图像为例, 利用 $\frac{1}{16} \times [111\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1]$ 的点扩散函数 PSF 与之进行卷积操作得到重影模糊图像, 如图5所示。图5b与实际拍摄的重影模糊图像的模糊形式十分类似, 说明了本文提出的快门编码模型的合理性, 并且模糊长度与点扩散函数 PSF 的长度相等, 都为 27 pixel; 已知 PSF, 由式(7)推导可得图5b对应的码字为“111000111111000111000110011”。使用准确的码字和模糊长度对图5b进行复原, 即模糊长度 $k=27$ pixel, 码字 $C=111000111111000111000110011$, 复原结果如图5c所示。

对比图5a和图5c可知, 在正确的码字和模糊长度已知的条件下, 可基本恢复出重影模糊图像。

但实际中很难满足该条件,因此有必要分析码字和模糊长度的选取对算法有效性的影响。



图5 “Cameraman”图像实验结果图

在图像盲复原的实际应用中,一方面,一般只有模糊图像是已知的,而仅仅根据模糊图像很难估计出正确的码字;另一方面,鉴于快门编码模型是对重影模糊本质的一种近似,因此本文采用穷举法估计码字,即首先给定一固定长度 m ,穷举出所有长度为 m 的码字,对每一个码字估计出相对应的复原图像,最后从所有的复原图像中选择出恢复质量较好的结果。长度为 m 的码字共有 2^m 个,因此,给定的码字长度不宜太长,否则算法的计算量太大。下面给出一组对图5b进行实验的结果,如图6所示。在图6a~图6c的3种情况下,模糊长度 k 都设为27 pixel。图6实验的效果虽然不如图5c的效果,但是与图5b的模糊图像相比,图像质量已经有了较大改善,而且虽然码字长度不同,但是3种实验结果的复原效果相差不多。通过大量的实验发现,从复原效果和计算量两个方面考虑,码字长度 m 在8~10之间较为合适。



图6 码字长度不同的实验结果

图7是一组码字长度相同、模糊长度不同的实验结果,其中码字长度 $m=8$,模糊长度 k 分别为24、27、30 pixel。与图5b的模糊图像相比,3幅复原图像基本上都有效地消除了重影模糊,而且虽然模糊长度设置不同,但恢复效果基本相当。通过仿真实验统计得出,估计误差在 $\pm 15\%$ 以内的模糊长度所对应的复原效果较好,这是由于快门编码模型被用于近似地模拟重影模糊图像。在尚无有效的模糊长度自动估计算法的情况下,利用图像中的模糊痕迹来估计模糊长度的方法较为有效,其估计误差基本可以控制在 $\pm 10\%$ 之内。

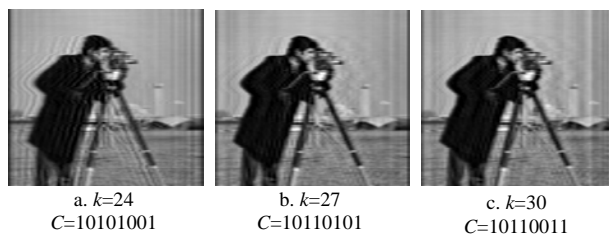


图7 模糊长度不同的实验结果($m=8$)

2.2 实际图像的实验结果及分析比较

为了验证基于快门编码模型的盲复原算法的有效性和实用性,本文对实际拍摄的重影模糊图像进行复原实验,结果如图8所示。图8a是原始的重影模糊车牌图像,其中车牌号码已无法辨识;图8c是在码字长度 $m=8$ 、模糊长度 $k=35$ pixel的条件下对图8a进行复原得到的结果,对应的码字为“10100100”;图8e和图8g是对图8c进一步复原的结果,其中码字长度 $m=8$ 、模糊长度 $k=18$ pixel,对应的码字分别为“10110001”和“11110100”。

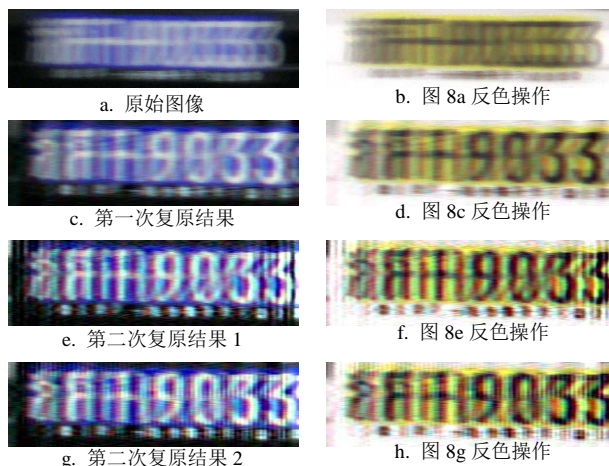


图8 实际重影模糊图像的复原结果(本文算法)

观察第一次复原的结果图8c,虽然图像质量已经有了较大改善,如号码“9033”基本可以识别出,但仍存在重影模糊的现象,因此考虑对图8c进行二次复原。二次复原结果图8e和图8g与一次复原结果图8c相比,复原图像质量再次得到了改善,如“浙”字更为清晰。实验表明“反色”操作(即反色图像的像素值等于255与原始图像相对应的像素值的差值)对于图像视觉效果具有一定的增强作用,因此对图像图8a、8c、8e和图8g进行反色操作得到相应的反色图像如图8b、8d、8f和图8h所示。综合复原结果图8d、8f和图8h,可以明确地识别出原始重影模糊图像8a中的车牌号码为“浙FH9033”,识别率达到了刑侦工作的要求。

图9是3种其他复原算法的复原结果。对重影模

糊图像图8a, 分别利用 Fergus 算法^[7]和 Qi 算法^[8]在不同的参数条件下进行多次实验, 复原效果都不太理想, 分别如图9a 和图9b 所示。图9c 是利用匀速直线运动模型在模糊长度位于30~40范围内进行多次实验得到的相对较好的复原结果。

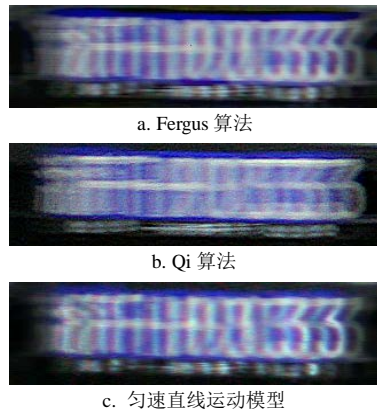


图9 3种其他算法的复原结果

与本文算法的实验结果(如图8)对比, 上述其他3种算法对如图8a所示的重影模糊较为严重的图像的复原结果均不理想, 从而表明了本文算法对重影模糊图像进行盲复原的有效性。

3 总结

针对重影模糊图像, 本文提出了一种快门编码模型用于模拟重影模糊图像的成像原理, 并在该模型的基础上设计了一种重影模糊图像的盲复原算法。实验结果表明, 该算法可以较好地复原出重影

模糊图像中的感兴趣信息, 具有一定实用价值。但是, 快门编码模型仅适用于重影模糊图像的复原, 而且该模型是一种近似模型, 尚不能精确地对重影模糊图像的成像原理进行建模。

参 考 文 献

- [1] HANSEN P C, NAGY J G, O'LEARY D P. Deblurring images: matrices, spectra, and filtering[M]. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematic, 2006.
- [2] SCHUON S, DIEPOLD K. Comparison of motion deblur algorithms and real world deployment[J]. ACTA Astronautica, 2009, 64(11-12): 1050-1065.
- [3] 孙即祥. 图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. SUN Ji-xiang. Image processing[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [4] RICHARDSON W. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, A62: 55-59.
- [5] LUCY L. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of Astronomy, 1974, 79: 745-754.
- [6] RASKAR R, AGRAWAL A, TUMBLIN J. Coded exposure photography: Motion deblurring via fluttered shutter[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 795-804.
- [7] FERGUS R, SINGH B, HERTZMANN P, et al. Removing camera shake from a single photograph[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3): 787-794.
- [8] SHAN Qi, JIA J, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3): 1-10.

编辑 税红