

高速运动目标的运动模糊图像复原研究

张玉叶¹, 周胜明¹, 赵育良¹, 王春歆²

(1. 海军航空工程学院青岛校区 航空侦察教研室, 山东 青岛 266041;
2. 北海舰队指挥所, 山东 青岛 266001)

摘要: 对单一图像进行运动模糊复原, 存在模糊点扩散函数(PSF)难以估计以及图像反卷积的病态性问题。利用多个 PSF 具有联合可逆性的特点, 针对运动目标观测, 提出采用参数相同的多个成像设备共同对同一视场进行拍摄, 来获取背景相同、曝光时间不同、目标模糊程度不同的观测图像; 然后利用同一设备获取的序列图像进行目标的模糊 PSF 估计; 并根据目标背景的运动模糊叠加特征, 分别从观测图像中提取出完整的模糊目标图像; 最后, 对这些具有不同 PSF 的同一目标图像进行空间域迭代复原算式的联立求解。实验表明: 该方法设计的目标获取装置对硬件条件要求较低, 获取的图像更便于采用多点扩散函数联合进行图像复原, 复原效果良好。

关键词: 运动模糊复原; 点扩散函数可逆性; 病态问题; 计算摄影

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0428001

Motion-blurred image deblurring of fast moving target

Zhang Yuye¹, Zhou Shengming¹, Zhao Yuliang¹, Wang Chunxin²

(1. Air Reconnaissance Department of Qingdao Branch, Navy Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China;
2. Command Post of North Sea Fleet, Qingdao 266001, China)

Abstract: In the process of a single motion-blurred image restoration, it is difficult to estimate point spread function(PSF) and the ill-posed deconvolution will affect restoration result. Considering that several different PSFs can get joint invertibility to make deblurring well-posed, it was proposed that the motion-blurred images of different PSFs could be obtained by multiple cameras with same parameters to shoot continuously at high speed moving target in one field of view. The images had the same brightness, different exposure time, and different motion blur. The PSFs were easy to be estimated by consecutive frames. According to the motion-blurred character of the target and background imaging pixels, complete convolution blurred images of the target could be extracted from the observation images respectively. Finally, the target image was recovered by iterative restoration in the spatial domain by multiple images joint solution. Experiments show that the method only needs common hardware, and the obtained images can help more exact image restoration by joint PSFs solution. And the restoration results maintain details well and have lower signal noise ratio (SNR).

Key words: motion-blurred deblurring; PSF invertibility; ill-posed problem; computational photography

收稿日期: 2016-08-11; 修订日期: 2016-09-12

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2013F0025)

作者简介: 张玉叶(1980-), 女, 副教授, 博士, 主要从事图像复原方面的研究。Email: amigo_yezi@sohu.com

0 引言

运动模糊复原一直是图像处理领域中公认的难题,由于光线的移位叠加作用,运动目标在成像过程中损失了很多高频信息。多年来发展的运动模糊复原方法,始终围绕着建立反卷积数学模型找回或者拟合逼近这些丢失信息进行。但是因为反卷积的病态性,复原过程容易受 PSF 估计误差及噪声影响,引入虚假信息,所以该问题的研究遇到瓶颈。近年来研究者们将计算摄影技术引入到运动模糊复原领域,开拓了一种全新的思路。

基于计算摄影技术的图像复原是通过设计新的图像获取方式,来获得更利于图像复原的信息。2004年, Ben-Ezra 等人^[1]首次提出借助高速视频传感器来辅助估计运动模糊 PSF, 发展了一类基于视觉测量技术的方法, 该类方法对成像设备的配置及组合要求较高。到 2006 年, Raskar 等人^[2]提出在相机曝光时间内快速开-关快门的编码曝光(Coded Exposure, CE), 可以获取可逆的运动模糊点扩散函数(PSF), 也就是 PSF 在频域无零点存在, 从而将病态性的复原问题转化为良态。CE 方法获取可逆 PSF 的思想^[3]引起了研究者广泛的关注, 也得到了进一步的发展。但是 CE 方法需要复杂的快门控制设置, 对于局部图像复原的前提假设是均匀背景, 并且需要手动进行 PSF 估计和目标分割。2009 年, Agrawal 等人^[4]利用普通相机通过连续拍摄, 并改变曝光时间来记录同一目标, 得到多个具有不同 PSF 的运动模糊目标图像, 从而引入零填充的概念来构建可逆的 PSF, 进行多图像联合复原。该方法成像设备要求简单, 克服了前面方法中复杂的硬件设计问题。但是, 该方法需要在目标运动的过程中, 不断变换曝光时间连续拍摄。对于高速运动目标, 相邻帧中目标图像形态变化会比较大, 从而影响联合复原效果。另外, 该方法利用阈值分割提取目标, 不能有效去除模糊过程中叠加进来的背景像素影响, 也增大了后续复原处理的误差。

文中借鉴联合多个 PSF 构建可逆的 PSF 的思想, 提出利用设备参数相同的多个图像获取装置, 来获取在同一背景下, 运动模糊程度不同的目标影像。另外, 针对从复杂背景中提取目标, 难以准确地分离

目标与背景模糊叠加部分的问题, 文中提出根据目标背景的运动模糊叠加特征, 分别从图像中提取出完整目标影像, 进而对空间域迭代复原算式进行联立求解。

1 运动模糊复原的病态性及多 PSF 的联合可逆性分析

1.1 图像复原的病态性

由于图像模糊的过程, 实际上是被景物成像点在曝光时间内的移位叠加过程, 所以图像模糊过程可以用卷积数学模型来描述:

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

式中: g 为模糊图像; f 为清晰图像; h 为模糊点扩散函数; \otimes 为卷积运算; n 为噪声。

该模型转化到频域表示为:

$$G=F \cdot H+N \quad (2)$$

式中: G 、 F 、 H 、 N 分别是模糊图像 g 、清晰图像 f 、点扩散函数 h 、噪声 n 的傅里叶变换。由频域计算, 清晰图像的估计式可表示为:

$$\hat{F}=\frac{G}{H}=F+\frac{N}{H} \quad (3)$$

而运动模糊点扩散函数的频域形式 H 存在零点, 所以图像中的噪声或干扰在复原过程中容易被过度放大, 从而影响复原结果, 这就是图像复原的病态性。从求解计算的角度理解是 PSF 不可逆造成的, 从物理意义上说, 实际上是成像过程中的高频信息丢失造成的。要将病态问题改造为良性, 就需要将可逆的 PSF 转化为可逆的。Agrawal 等人提出利用可变曝光相机获取多幅同一运动目标的具有不同 PSF 的图像, 多个 PSF 联合具有可逆性。

1.2 不可逆 PSF 的联合可逆性^[4-5]

假设变化曝光时间拍摄同一目标得到 N 幅运动模糊程度不同的图像, 利用频域滤波公式(3)分别进行图像复原, 这里每个反卷积滤波器 $\frac{1}{H_k}$ 用 V_k 来表示。

$$V_k=\frac{1}{H_k}=\frac{H_k^*}{|H_k|^2} \quad k=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

最优的反卷积滤波器 V_k 可以用最小化噪声强度得到, 又因为 $\sum_{k=1}^N V_k H_k=1$, 所以构造 Lagrange 代价函数得到:

$$J(w)=\sum_{k=1}^N N_k^2 |H_k|^2+\lambda(\sum_{k=1}^N V_k H_k-1) \quad (5)$$

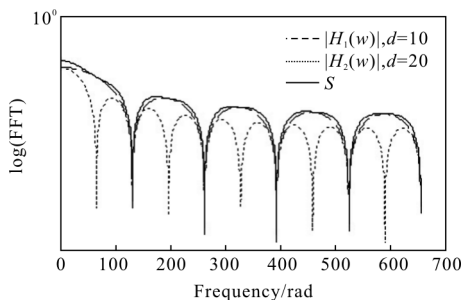
最小化 $J(w)$ 对 V_k 求导得:

$$V_k = \frac{H_k^*/N_k^2}{\sum_{k=1}^N |H_k|^2/N_k^2} \quad (6)$$

那么对多幅图像联合估计清晰图像得到

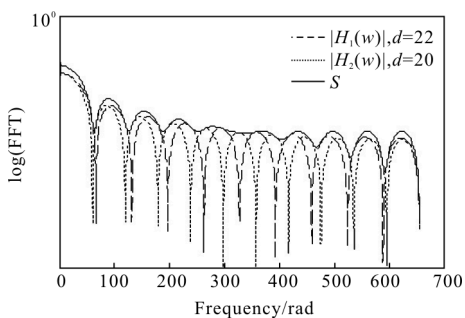
$$\hat{F} = F + \frac{\sum_{k=1}^N H_k^* N_k}{\sum_{k=1}^N |H_k|^2/N_k^2} \quad (7)$$

由上式可以发现: 只要 $\sum_{k=1}^N |H_k|^2 \neq 0$, 就可以改变复原问题的病态性。如图 1 所示, 每个曲线图中分别显示单个 PSF 的频谱模 $|H_k|$ 曲线, 以及所有 PSF 的频谱模平方之和 S , 这里 $S^2 = \sum_{k=1}^N |H_k|^2$ 。比较图 1(a) 和图 1(b), 可以看到每个 PSF 在频域范围内都有零点



(a) 运动模糊长度成倍数关系

(a) Case of multiple motion blur lengths



(b) 运动模糊长度不成倍数关系

(b) Case of no multiple motion blur lengths

图 1 不同 PSF 的频域模及其模的平方和 S 的曲线图

(图示中 d 表示运动模糊长度)

Fig.1 Curves of different PSFs' frequency spectrum modules and the squares sum S of modules (d denotes motion blur length)

或极小值, 但是图 1(b) 中两个 PSF 在一定的频率上没有共同的零点, 就可以保证 S 不存在零点, 即保证多个 PSF 的联合可逆性。而图 1(a) 两个 PSF 运动模糊长度成倍数关系, 即曝光时间成倍数关系, 所以在

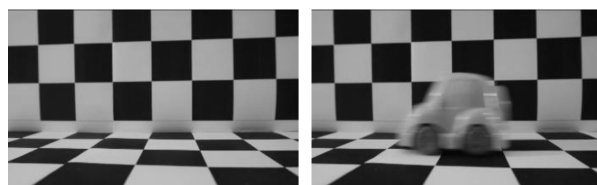
频域上存在若干共同极小值点, 相应的, 也存在若干极小值点。所以在获取不同曝光时间的图像时, 要求曝光时间相近, 不能互为整数倍关系。

另外, 对运动模糊 PSF 来说, 运动模糊长度越长, 存在零点或极小值点越多, 也就是丢失的信息越多, 要保证 PSF 的联合可逆性, 需要获取多幅曝光时间不同的图像。这可以理解为, 多个不同曝光时间的目标模糊图像, 可以在复原过程中进行信息的互补, 理论上 k 值越大越好, 但是考虑到计算复杂度及获取图像代价, k 通常取 2~4。

2 设置不同快门的成像设备组合

为了获取具备不同运动模糊长度的同一目标图像, Agrawal 等人提出的可变曝光连续图像获取, 需要在连续拍摄运动目标的过程中, 不断变换曝光时间。但是在拍摄的间隔时间内, 目标的持续运动不可避免地会使得拍摄目标的角度发生变化, 造成目标影像形态差异, 这样对多幅 PSF 不同的观测图像联合进行复原运算时, 使得复原结果误差较大。

文中采用对同一视场进行拍摄的多台固定的相机来捕捉运动目标。这些相机型号相同, 多台相机靠紧固定, 在拍摄距离较远的条件下, 不同相机拍摄的同—目标位置影像差别极微小, 可以控制在 1 pixel 内, 从而忽略不计。对每台相机设置相同的帧频, 使得快门开启的时间相同, 同时设置不同的曝光时间, 这样当运动目标经过指定视场时, 不同相机可以获取同一静止背景下不同运动模糊程度的运动目标影像。图 2(a) 显示的是视场背景图像, 图 2(b) 和图 2(c) 显示的是利用可变曝光连续拍摄得到的两幅观测图像, 可以看到: 目标的角度差异较大, 而利用文中装置进行拍摄, 得到的观测图像中目标起始位置是相同的, 所以两目标图像形态差别不大, 如图 2(b) 和图 2(d)。

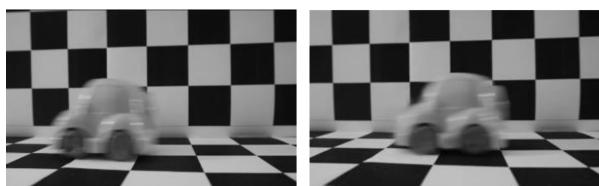


(a) 背景图像

(b) 观测图像 1

(a) Background image

(b) Observation image 1



(c) 观测图像 2 (d) 观测图像 3
(c) Observation image 2 (d) Observation image 3

图 2 采用不同方式获取的观测图像

Fig.2 Observed images obtained by different methods

3 运动模糊目标图像 PSF 估计及分割提取

3.1 运动模糊 PSF 估计

不同曝光时间获取的图像,运动模糊程度也不同,需要分别估计出每幅图像的运动模糊 PSF。传统的仅对单幅模糊图像进行的 PSF 估计准确度是比较低的^[6-8]。而文中获取图像的方式,与一架相机连续获取的目标图像相同,其运动模糊 PSF 是一致的,获取时间由相机系统时间设置可以直接得到,然后根据两幅图像目标在背景中位置的差异,容易计算得到目标图像的运动速度 v (单位:pixel/s), v 与曝光时间的乘积就是目标图像的运动模糊长度 d (单位:pixel),从而得到运动模糊 PSF。

3.2 运动模糊目标图像的分割提取

对于静止背景中运动目标的复原,首要的一点就是对完整目标图像的分割提取。对于这个目标提取问题,CE 方法假设背景是灰度均匀的,难以处理复杂背景情况;Agrawal 等人利用连续帧获取的目标图像位置差异来估计 PSF,然后利用静态图像抠图法进行目标区域提取,在目标分割提取过程中,利用目标初步去模糊来提高分割精度,但是由于没有考虑去除在模糊过程中融入的背景,分割结果仍然存在较大误差,势必影响复原结果。该方法则根据运动模糊叠加特征进行目标图像的分割提取。

设观测图像 I (见图 2(b)),其中的背景图像表示为 B (见图 2(a))。背景图像与观测图像进行异或运算,可以得到运动目标在观测图像中的蒙板 α (见图 3(a)), $\alpha=I\otimes B$,其中 \otimes 表示异或运算。对观测图像进行蒙板运算,得到黑色背景的“目标图像” $M=I\cdot\alpha$ (见图 3(b))。

M 不单纯是目标的运动模糊图像,由于曝光时间内目标背景的相对运动,使得在其运动方向上的边



(a) 蒙板 α (b) 蒙板运算结果
(a) Mask α (b) Mask operation result

图 3 蒙板运算过程图像

Fig.3 Images of mask operation process

界处,混合叠加了背景像素。为了提取出纯粹的运动模糊目标图像,目前,多数研究^[9-11]都借鉴图像“抠图”思想来描述该类模糊情况:

$$M=\beta f+(1-\beta)b \quad (8)$$

式中: f 为清晰目标图像; b 为对背景 B 进行 α 蒙板运算得到的背景图像; β 为图像 M 中任意位置 (x,y) 处目标图像像素所占的百分比, $0\leq\beta(x,y)\leq 1$ 。 M 的生成过程是:曝光时间内目标像素的不断扩散和背景像素被遮挡至曝光或者曝光至被遮挡的成像过程。所以公式(8)在忽略噪声 n 的情况下,结合图像退化模型公式(1)可表示为:

$$M=f\otimes h(1-\beta)b=g+(1-\beta)b \quad (9)$$

由于在曝光时间内,目标相对背景运动了 d 个像素,则在运动方向上目标图像的两侧、与背景交界处,各有 d 个像素宽的目标背景像素叠加区域。曝光时间非常短暂,可以认为目标做匀速直线运动,则图像 M 在运动方向上的任意一行,背景像素被目标遮挡的时间占曝光时间的百分比为:

$$\beta=\left[\frac{1}{d},\frac{2}{d},\dots,\frac{d-1}{d},1,1,\dots,\frac{d-1}{d},\frac{d-2}{d},\dots\right] \quad (10)$$

式中:“1”的个数等于该行实际目标图像宽度减去 d 个像素。

所以将公式(10)代入公式(9),而按上节方法, k 幅目标图像的 d_k 已经求得,从而可以分别对各观测图像提取得到运动模糊目标图像 g_k 。

4 多 PSF 图像联合求解

提取出来的 k 幅运动目标模糊图像 g_k ,可以利用空间域方法进行联合复原。比如单幅图像的空间域复原,则公式(1)可以用循环矩阵与向量的乘积来表达卷积^[12-14],如公式(11)所示:

$$g_k = B_k f + n_k \quad (11)$$

这里, g_k, f, n_k 转化为辞书式排列向量, 即从第一行起把二维矩阵的每个行转置向量一个接一个地排成一个单列向量。 B_k 是 h_k 的循环运动模糊矩阵。上节方法获取的运动模糊目标图像 g_k 是观测图像中的局部图像, 整个运动目标图像不存在截断, 所以是完全卷积图像。如果 f 长度为 n_1, h_k 长度为 n_2 , 则 g_k 长度为 $n_1 + n_2 - 1$ 。

公式(11)转化为线性方程:

$$A f = b \quad (12)$$

式中: $A = B_k^T B_k$ & $b = B_k^T g$, 该系统利用共轭梯度算法在空域求解。

对 k 幅图像联合求解, 则:

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_k \end{bmatrix} \quad (13)$$

相应地, 公式(12)转化为求解如下系统:

$$\left(\sum_{k=1}^N B_k^T B_k \right) \cdot f = \sum_{k=1}^N B_k^T g_k \quad (14)$$

图像 g_k 尺寸不同, 要进行联合复原, 只需要将图像补零对齐。虽然多 PSF 图像联合求解, 可以降低复原的病态性, 但是在多图像处理过程中不可避免地引入一些误差, 为了去除虚假波纹, 需要利用自然图像的先验知识如高斯先验等进行规整化复原。公式(12)中的系数矩阵 A 修改为:

$$A = B_k^T B_k + w(C_{gx}^T C_{gx} + C_{gy}^T C_{gy}) \quad (15)$$

式中: C_{gx}, C_{gy} 为 $g_x = [1, -1]^T, g_y = [1, -1]^T$ 差分滤波卷积矩阵; w 为权重参数。公式(14)转换为:

$$\left[\sum_{k=1}^N B_k^T B_k + w(C_{gx}^T C_{gx} + C_{gy}^T C_{gy}) \right] \cdot f = \sum_{k=1}^N B_k^T g_k \quad (16)$$

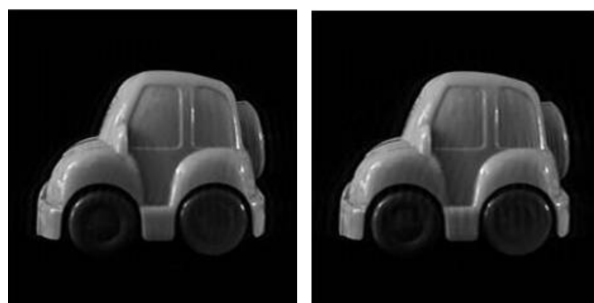
利用共轭梯度算法在空域求解。

5 实验

该方法对硬件设备要求低, 不需要 CE 方法中的昂贵的双目立体相机和编码相机, 也不需要 Agrawal 方法采用的连续改变曝光时间的工业级相机 Flea2, 该方法仅需要多台市面流行的具有连拍功能的数码相机。因为相机台数越多, 复原效果越好, 所以为了实验复原效果, 文中实验只选用两架 D7000 相机, 并排固定拍摄, 设置为连续拍摄模式, 帧频都

设为 6 fps(相机最大帧频)。两相机设置不同的曝光时间, 两者不成倍数关系, 并要求曝光时间在拍摄间隔内要求的最大值和最小值之间, 来获取曝光效果较好的照片。

实验一: 相机曝光时间分别为 40 ms 和 50 ms, 拍摄目标为一玩具汽车, 每架相机在拍摄视场内获取了 3 幅观测图像, 共 6 幅, 其中同一时间获取的两幅图像如图 2(b)、(d)所示, 按照文中方法的步骤: (1) 进行 PSF 估计, 两幅图像的运动模糊长度分别为 16 和 22 个像素; (2) 对图 2(b)、(d)进行运动模糊目标的抠图提取; (3) 对抠图结果图 3(b)进行联合空域规整化复原, 复原结果的局部效果如图 4(a)所示。而单独对这两幅模糊长度不同的图像进行空域迭代复原, 复原结果的局部效果如图 4(b)、(c)所示。3 幅图像的信噪比分别为 12.6、35.4 和 49.7 dB。观察图像也可发现多幅图像联合复原得到的结果图像边缘细节清晰, 而单幅图像的复原结果由于复原的病态效应, 即使进行规整化复原仍存在一些虚假波纹及噪点。



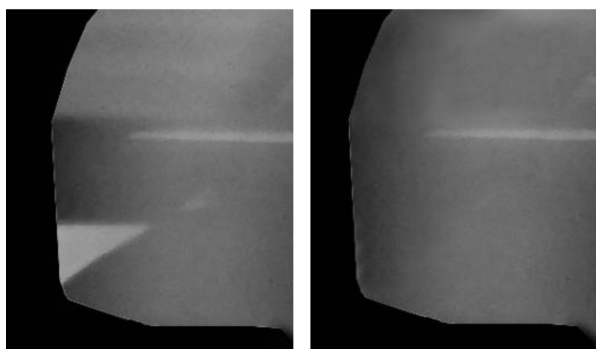
(a) 联合复原结果(12.6 dB) (b) 单图复原(35.4 dB)
(a) Joint restoration result (12.6 dB) (b) Single image restoration result (35.4 dB)



(c) 单图复原(49.7 dB)
(c) Single image restoration result(49.7 dB)

图 4 联合复原与单图复原的结果比较
Fig.4 Joint and single image restoration

实验二:比较实验一中步骤(2)采用阈值分割与文中抠图方法提取目标的局部图像效果,如图 5(a)、(b)所示。可以发现由于直接提取目标方法粗略分离目标背景,使得背景信息(黑白格)掺杂在目标模糊图像中,进而会影响复原结果。所以对于这种局部图像复原,需要利用运动模糊特征进行精确的目标分离提取。



(a) 阈值分割

(b) 文中方法

(a) Threshold segmentation

(b) Proposed method

图 5 阈值分割与文中抠图方法提取目标的局部效果比较

Fig.5 Local image effect comparison of threshold segmentation and proposed methods

6 结 论

文中设计了一种新的运动目标观测方式,可以同时获取相同背景、不同运动模糊程度的多幅目标观测图像,从而进行基于多 PSF 的联合可逆性的目标图像复原。相对于 CE 方法复杂的成像设备配置及摄影计算,该方法成像设备配置简单,市面流行的具有连拍功能的数码相机就能完成目标获取。该方法利用多台相机对同一视场同时打开快门拍摄,也避免了 Agrawal 等人利用可变曝光连续图像获取容易产生的目标影像形态差异问题。同时,该方法获取的图像容易进行准确的 PSF 估计,并采用运动模糊特征进行目标提取,从而提高了运动模糊目标复原的准确度及复原效果,具有较高的实用价值。

参考文献:

[1] Ben-Ezra M, Nayar S K. Motion-based motion deblurring [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(6): 689-698.
 [2] Raskar R, Agrawal A, Tumblin J, et al. Coded exposure

photography: Motion deblurring using fluttered shutter [C]// *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006*, 2006: 795-804.
 [3] 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)
 [4] Agrawal A, Xu Y, Raskar R. Invertible motion blur in video [C]//*Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009*, 2009: 95.
 [5] Rav-acha A, Peleg S. Two motion-blurred images are better than one[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005, 26(3): 311-317.
 [6] Liu Renting, Li Zhaorong, Jia Jiaya. Image partial blur detection and classification [C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008: 954-961.
 [7] Zhang Yuye, Zhou Xiaodong, Wang Chunxin. Space-variant blurred image restoration based on pixel motion-blur character segmentation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1119-1125. (in Chinese)
 [8] Xu Shukui. Research on motion blur image deblurring technology based on computational photography [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
 [9] Xu Cheng, Liu Yongcai, Qiang Wenyi, et al. Image velocity measurement based on motion blurring effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 625-650.
 [10] Zhao Dong, Zhao Hongwei, Yu Fanghua. Moving object image segmentation by dynamic multi-objective optimization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 2109-2114.
 [11] Chen Xi, Wang Yangang, Peng Silong. Restoration of degraded image from partially-known mixed blur[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(2): 272-276.
 [12] Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recover[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
 [13] Hong Hanyu, Li Liangcheng, Zhang Xiuhua, et al. Versatile restoration and experimental verification for multi-wave band image of object detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 251-255. (in Chinese)
 [14] Zhu Ming, Yang Hang, He Baigen, et al. Image motion blurring restoration of joint gradient prediction and guided filter[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 850-855. (in Chinese)