

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201704118

面向工业检测的图像快速去直线运动模糊方法

朱非甲, 金 鹏

(哈尔滨工业大学 电气工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在基于机器视觉的工业检测中, 由于受到传送带速度变化或曝光不足的影响, 得到的图像有时会产生运动模糊, 影响检测效果. 为去除工业检测中的图像运动模糊, 提出了基于 R-L 引导滤波的快速去直线运动模糊方法. 首先对图像的模糊参数进行评估, 使用图像的频谱图积分评估图像的模糊方向, 使用微分自相关方法得到模糊图像尺寸; 然后通过提出的 R-L 引导滤波方法快速去除运动模糊并抑制振铃效应, 得到清晰图像. 通过对工件图像去运动模糊的仿真, 证明了模糊核估计的准确性; 与 TPKE 和 HQ 比较, 提出的去模糊方法在对噪声的鲁棒性和抑制振铃的效果更好. 通过对不同速度、不同工件下实拍图像的去运动模糊实验, 以及客观评价指标、去模糊前后尺寸测量的差异和运行速度证明了该方法在工业检测中的优势. 实验结果表明: 提出方法的 R_{PSNR} 和 R_{SIMM} 优于对比方法, 在抑制振铃的同时保持了边缘的清晰; 同时, 提出方法对尺寸的测量影响也更小, 在小尺寸的工件上具有优势, 最大误差为 0.31 像素.

关键词: 图像复原; 运动模糊; 引导滤波; 工业检测; 图像处理

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)09-0123-07

Fast moving line motion de-blurring for image detection of industrial inspection

ZHU Feijia, JIN Peng

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In machine vision-based industrial inspections, due to changes in conveyor speed or underexposure, the resulting image may produce motion blur, affecting the detection effect. In order to remove the motion blur, a fast linear motion blur method based on RL guided filter was proposed to evaluate the blur parameters of the image first, and the image blurring direction was evaluated using the spectral map integral of the image. Using auto-correlation method to obtain the blur kernel size; then through the proposed RL-guided filtering method to quickly remove the motion blur and suppress the ringing effect, to get a clear image, proved the accuracy of fuzzy kernel estimation. Compared with TPKE and HQ, the proposed deblurring method is better for noise robustness and ringing suppression. Through the experiments of real-shot images under different speeds and different workpieces, the objective difference between the objective and the deblurred dimension measurements and the speed of operation were used to prove the superiority of this method in industrial inspection. The results show that the R_{PSNR} and R_{SIMM} is superior to the contrast method, which suppresses ringing while maintaining the sharpness of the edges. At the same time, the proposed method has a smaller influence on the measurement of the size and has an advantage over a small-sized workpiece. The maximum error is 0.31 pixels.

Keywords: image restoration; motion blur; guide filter; industrial inspection; image processing

随着自动化工厂的普及, 机器视觉技术广泛用于工业生产, 进行零件的识别和检测. 然而, 由于受到传送带速度变化或曝光不足的影响, 得到的图像可能会产生运动模糊, 影响检测效果, 因此需要对图像去模糊^[1]. 根据模糊核即点扩散函数 (PSF) 是否已知, 去模糊方法可分为非盲复原和盲复原两类^[2-4]. 前者的 PSF 已知, 仅需进行图像复原; 而后者需要估计 PSF 并恢复出清晰的图像. 无论是估计

PSF 还是去模糊, 从单张运动模糊的照片中恢复出清晰的图像, 都是数字图像处理的重要课题^[5].

针对图像去运动模糊, 国内外有大量的相关研究. 如经典的维纳滤波^[6], 它通过计算最小方差来恢复图像; 常用的 Richardson-Lucy 反卷积^[7], 假定自然图像的像素服从泊松分布, 通过迭代求解. 文献[8]用一种基于偏微分方程 PDE 的方法恢复自然图像, 通过结合抗反射边界条件和再次模糊的步骤, 减弱了振铃效应. 文献[9]根据二维模糊图像的模糊路径进行离散化, 估计 PSF 并进行恢复. 文献[10]采用自然图像的导数稀疏作为约束, 在反卷积过程中力图减少人工振铃效应. 文献[5]分析了噪声对恢复效果的影响, 建立了噪声在空域的概率模

收稿日期: 2017-04-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA042401)

作者简介: 朱非甲(1984—), 男, 博士研究生;

金 鹏(1972—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 金 鹏, P.Jin@hit.edu.cn

型,在估计和恢复之间迭代,得到准确的模糊核,最后引入局部平滑映射抑制伪影,得到良好的复原结果. 文献[11]认为 PSF 估计不应依赖于强边缘,因而提出一种新的量度来选择边缘,进而初步评估 PSF 核,然后使用基于空间先验和迭代支持检测 (ISD) 的方法优化 PSF,最后使用 TV-1 反卷积模型来抑制噪声,得到了优秀的去噪结果. 由于大部分方法都假定模糊核没有误差和噪声,所以对 PSF 的估计误差和图像采集过程中引入的噪声都会产生明显的振铃效应^[5],在工业检测中会引发误检. 同时很多效果良好的方法往往需要多次迭代,繁重的计算使在生产线上进行实时去模糊变得困难. 针对上述问题,本文提出一种快速去除匀速直线运动模糊的方法,该方法可以快速评估模糊核并进行图像复原. 在恢复工业检测中关心的清晰形状边缘和运算速度两方面表现良好,并且不需要额外的硬件.

1 匀速直线运动的模糊核估计

1.1 匀速直线运动物体的模糊核

当相机曝光时,运动的被测物会在 CCD 上产生拖影,运动的方向和距离决定了模糊核 (PSF) 的大小. 根据线性系统理论,图像的模糊模型为

$$I = L \otimes P + n. \quad (1)$$

其中: I 为模糊的图像矩阵, L 为原图像矩阵, n 为加性噪声, P 为线性时不变点扩散函数 PSF. 对于匀速直线运动模糊, $P(x)$ 的表达式为

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{N}, & 0 \leq x \leq N-1; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

其中 N 为位移的大小.

1.2 模糊核估计

1.2.1 运动方向估计

运动模糊角度的估计可以通过分析图像的频谱得到. 由傅里叶变换可知,沿着 x 轴运动的匀速直线运动模糊的频域表达式为

$$\begin{aligned} H(u, v) &= \int_0^T \exp[-j2\pi x_0(t)] dt = \\ &= \int_0^T \exp[-j2\pi uat/T] dt = \\ &= T \sin(\pi ua) \exp(-j\pi ua) / (\pi ua). \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $H(u, v)$ 在 $u = n/a$ 处为零,所以其频谱会产生周期性的条纹,其在 θ 方向的投影会产生一系列局部极值,条纹的法向量指向物体的运动方向,如图 1 所示.

通过常用的 Radon 变换可以检测该方向^[12]. 该变换在极坐标中进行,需要对 $0^\circ \sim 180^\circ$ 各个方向进行 Radon 变换. 因为工业检测中的物体运动方向通

常已知,所以无需遍历整个角度空间,仅需适当放宽检测范围即可确定其精确角度. 例如已知传送带上物体运动方向为 90° ,则根据运动误差适当放宽检测范围,如 $90^\circ \pm 1^\circ$ 即可,这将显著缩短检测时间.

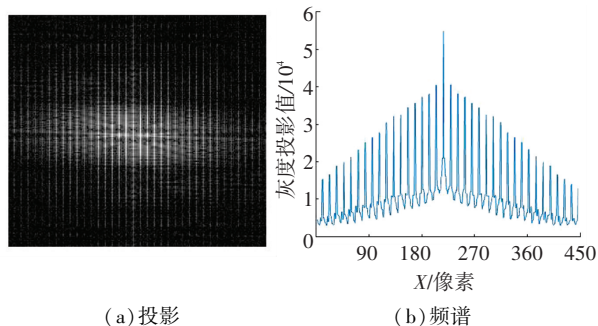


图 1 模糊图像的频谱图及其投影

Fig.1 Spectrum of blurred image and its projection

1.2.2 模糊核尺寸估计

得到模糊方向后,将图像旋转到模糊方向与 X 轴平行,然后使用微分自相关方法^[13]进行模糊核尺寸估计,其尺度估计曲线如图 2 所示,其最小值之间距的一半即为模糊核长度. 对于图中的情况,两个次小峰的距离为 30 像素,则相应的 PSF 为长 15,值为 0.047 6 的一维向量.

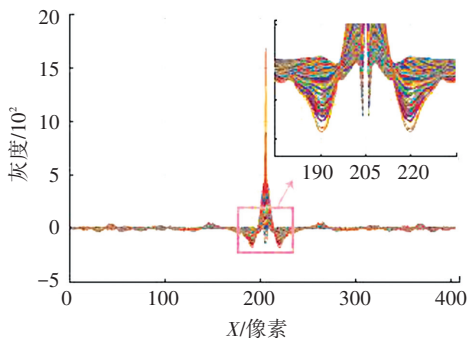


图 2 PSF 尺度估计曲线

Fig.2 PSF scale estimation curve

2 基于 Richardson-Lucy 引导滤波的去模糊方法

2.1 Richardson-Lucy 滤波

Richardson-Lucy 法^[13]假设成像服从分布:

$$I(i) = \sum_j P(i|j) O(j). \quad (4)$$

式中 I 为模糊图像, O 为原图像, $P(i|j)$ 为点扩散函数. 观察计数 $D(i)$ 和期望计数 $I(i)$ 的联合概率分布为

$$P(D/O) = P(D/I = P \times O) = \prod_{r \in S} \exp\{- (P \times O)\} \cdot \frac{[(P \times O)]^D}{D!}. \quad (5)$$

可以得到迭代公式

$$O_{\text{new}}(j) = O(j) \frac{\sum_i P(i|j) D(i)}{\sum_i P(i|j) I(i)}.$$

(6)

R-L 算法采用最大似然法进行估计, 执行速度较快. 但因为对原图的噪声估计并不精确, 因此恢复的图像会产生明显的振铃. 在物体边缘处产生的伪影会影响尺寸的测量, 并被检测程序误认为是缺陷, 从而产生误检.

2.2 引导滤波

引导滤波是近年提出的一种同时考虑空间差异和亮度差异的滤波^[14]. 它利用引导图像的结构特征, 对输入图像进行滤波. 滤波后的图像在保留了输入的图像的整体特征的同时, 又表征了引导图像的结构变化^[15-17].

引导滤波假设输入图像和引导图像在局部范围内存在线性关系. 设输入图像为 p , 输出图像为 q , 引导图为 I , 则在以 k 为中心的窗口 w_k 中有

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k.$$

(7)

为确定系数, 可转化为最优化问题:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k I_i + b_k - P_i)^2 + \varepsilon a_k^2).$$

(8)

其中 P_i 为要处理的图像, 参数 ε 为了防止 a_k 过大. 该式可以利用线性回归求解, 即

$$a_k = \frac{\frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} I_i p_i - \bar{\mu}_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon},$$

(9)

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \bar{\mu}_k.$$

(10)

式中 $\bar{p}_k$ 为 P 在窗口 w_k 内的均值, σ_k^2 为 I 在窗口 w_k 内的方差. 由于像素会被多个窗口覆盖, 因此在最后对所有可能的 a_k 和 b_k 取均值.

对式(7)两侧取梯度可以得到 $\nabla q_i = a_k \nabla I$, 也就是只有在引导图存在边缘的位置, q 才会存在边缘. 这使得引导滤波在平滑图像的同时具有边缘保持特性. 系数 a 决定了边缘保持的强度. 当 a 较大时, 输出的梯度值也较大, 物体的边缘更清楚; 当 a 较小时, 输出的梯度值变小, 物体的边缘也变得更平滑.

2.3 基于 R-L 引导滤波的去模糊

R-L 方法去模糊后会产生振铃, 这是一种在模糊图中并不存在的梯度变化, 因此可以利用引导滤波的梯度同步特性进行抑制. 然后, 结合梯度信息融合滤波前后的两幅图像, 得到边缘清晰, 振铃效应减弱的去模糊图. 设模糊图像为 I , W 为 R-L 滤波, G 为引导滤波, 则恢复图像 L 为

$$L = \tau W(I) + (1 - \tau) G(I, W(I), \kappa).$$

(11)

使用模糊图像 I 作为引导图像, κ 为滑动窗口大小. 这里引导滤波使用 MATLAB 提供的

imguiddfilter 函数计算, 其中两个主要参数 neighborhoodsize 和 degreeofsmoothing, 分别表示引导滤波的窗口大小和平滑力度. 实验表明, 窗口大小设为 PSF 的尺寸, 平滑力度设为 0.16 时, 能在抑制振铃和保持边缘之间取得最好的平衡. τ 为引导图在去模糊图像中的权重, 可表示为

$$\tau = \text{sgn}(|\nabla_{\text{axis}} I| + \xi).$$

(12)

其中 $\nabla_{\text{axis}} I$ 为图像在运动方向的梯度; ξ 为一小数, 使符号函数不为零. 当像素位于边缘时, τ 较大, 输出值中 R-L 去模糊的权重大; 而在较为平滑的位置, τ 较小, 输出值中引导滤波后的权重大. 这里使用符号函数而不是高斯或 Sigmoid 这类平滑函数的原因是为了保持边缘的清晰.

为验证提出方法法的有效性, 获取一副金属条纹的工件图, 通过 MATLAB 仿真得到运动模糊图像, 然后使用第 1 节的方法估计模糊角度和模糊尺寸, 并用提出的方法恢复图像. 如图 3 所示, 3(a) 和 3(d) 为移动方向为 90° , 模糊核大小分别为 5 像素和 10 像素的图片, 图 3(b) 和 3(e) 为 R-L 滤波的结果, 图 3(c) 和 3(f) 为提出的方法得到的结果. 由图可见, R-L 滤波在线条边缘内外产生了扩散的伪影, 而本文提出的方法几乎没有伪影产生. 为测量去除模糊对尺寸测量的影响, 测试了去模糊前后工件的线宽, 结果见表 1. 可见, 提出的方法较好的恢复出了边缘, 对尺寸测量的影响较小.

表 1 线宽测量结果

Tab.1 Line width size measurement results

模糊核尺寸/像素	实际线宽/像素	测量线宽/像素	相对误差/%
5	22.3	22.2	0.44
10	22.3	22.1	0.89

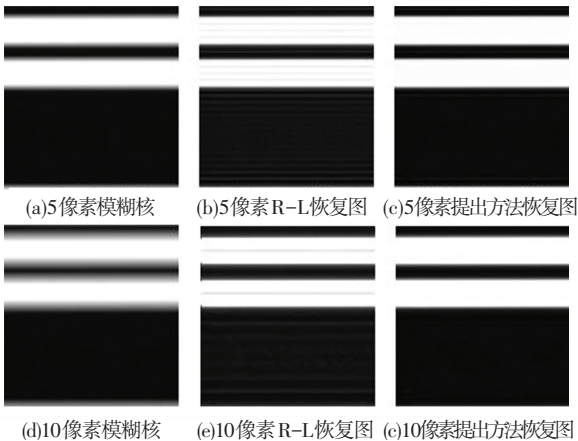


图 3 模糊图像及复原结果

Fig.3 Blurred images and deblurred results

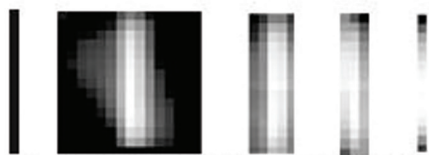
3 仿真和实验

3.1 仿真

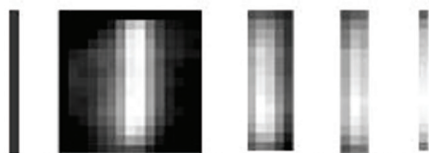
通过运动模糊仿真, 可以在参数可控的条件下

考察算法性能. 使用方向为 90° , 长度为 15 个像素的矢量作为模糊核处理一副实际拍摄的工件图片得到仿真图像. 接着添加均值 0.005, 方差 0.000 1 的高斯噪声得到另一幅加噪的仿真图像. 分别使用 HQ Motion Deblur^[5] (HQ)、two-phase kernel estimation for robust motion Deblur^[14] (TPKE) 和提出的算法对仿真图像进行去模糊.

需要说明的是, 虽然前两种方法都包括 PSF 估计和去模糊两部分, 但通过仔细的调参表明, 其对匀速直线运动的 PSF 评价较第 1 节中给出的方法有更多误差. 如图 4 所示, 图 4(a) 为运动模糊使用的模糊核及 HQ 方法评估得到的模糊核. 真是模糊核尺寸为 15 个像素, 方向为 90° . 图 4(b) 为提出的方法的估计和 TPKE 方法评估得到的模糊核. 因为 HQ 和 TPKE 两种方法需要输入 PSF 核的高和宽作为估计范围, 因此使用高为 15 像素, 宽分别为 15、5、3 和 1 像素作为参数进行估计. 可以看到, 当给出的宽度较大时, 这两种方法都在与运动方向成 45° 角的范围内产生了错误的估计; 当宽度逐渐缩小时, 在水平方向的评估误差仍然存在; 指定宽度为 1 时, 估计误差才会接近真值. 因此这里使用第 1 节中方法得到的模糊核尺寸作为后两者的模糊核评估参数.



(a) 真实和 HQ 方法评估的模糊核



(b) 提出的方法及 TPKE 方法评估的模糊核

图 4 三种方法的 PSF 评价

Fig.4 PSF evaluation of 3 methods

仿真图像和恢复结果如图 5 所示. 可见, 因为有匀速直线的先验信息, 提出的方法得到了准确的 PSF. 而其他两种方法仅有直线运动的先验, 而不知道速度, 因此产生了误差, 由图可见, 基于高斯分布的假设使两者的 PSF 都有平滑的倾向. 相比之下, 因为更准确的细节梯度图和 ISD 迭代优化^[14], TPKE 得到的 PSF 的方差更小, 接近真值.

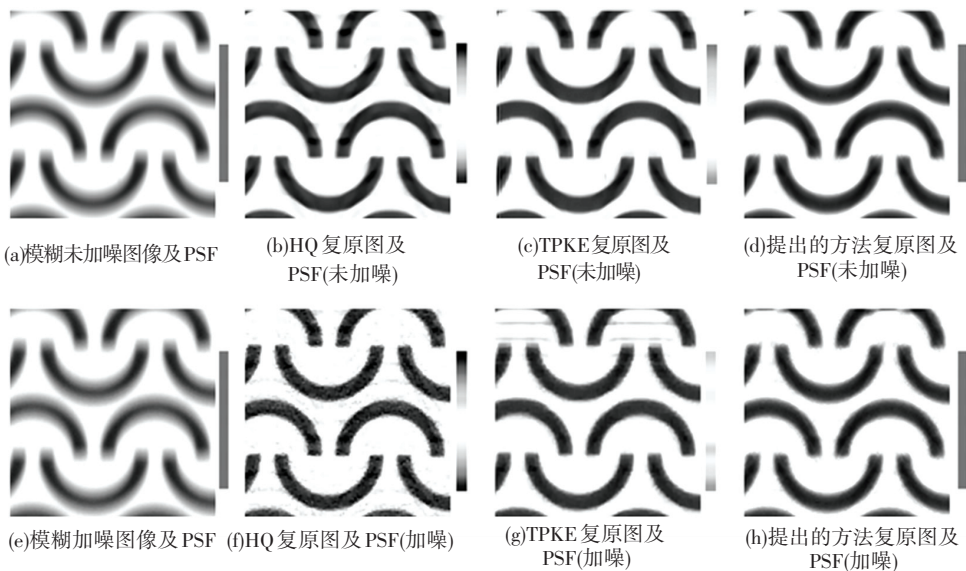


图 5 仿真模糊图像及复原结果

Fig.5 Simulation of blurred images and restoration results

当图像没有噪声时, 因为 HQ 方法对 PSF 估计误差稍大, 因此恢复的图像在线条边缘处产生了较多的振铃. 而 TPKE 恢复的结果良好, 比提出的方法产生了稍多的伪影, 但边缘更为锐利. 当图像引入了轻微的噪声时, 提出方法的优势开始显现. 如图, HQ 方法产生了更多的振铃; TPKE 法依靠 L1 全变分作为约束, 在图像大部分区域消除了噪音的影响, 但在图像的上边缘处仍然产生了振铃; 而提出的方

法依靠梯度平滑约束, 抑制了几乎所有的伪影.

3.2 实验

在实际检测环境中, 工件运动速度和方向的抖动、拍摄平台的扰动等都与相对理想的仿真环境不同, 因此需要通过实验来检测算法在实际应用中的效果. 实验平台如图 6 所示, 相机为 JAI_BM-500GE, 快门时间设置为 10 ms; 镜头为 4 倍远心镜头 MML-HR4; 工件放置在镜头下方的承片台上, 可

沿 Y 轴方向以某个速度运动. 实验中使用的样件有两种, 一种为由大到小排列的圆孔, 另一种是被纤维污染的直线阵列, 两者的位移速度分别为 2、4 mm/s, 清晰的图像和获取的模糊图像如图 7 所示.

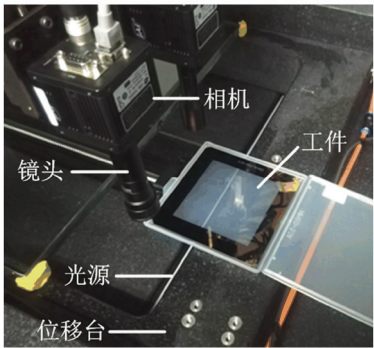
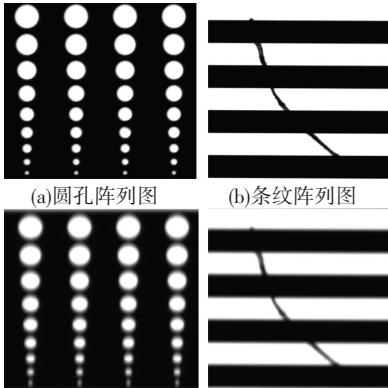


图 6 实验平台
Fig. 6 Experiment platform



(c)圆孔阵列运动模糊图 (d)条纹阵列运动模糊图

图 7 采集的模糊的图像
Fig.7 Acquired blurred images

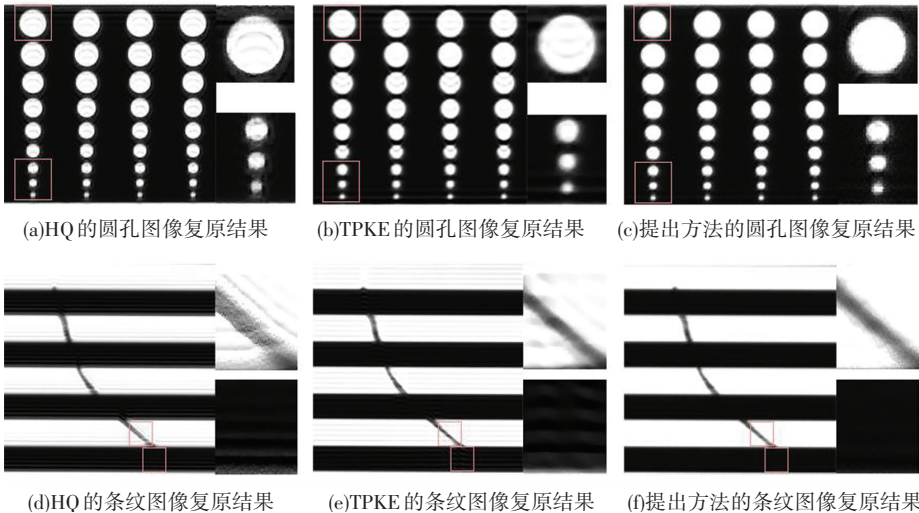


图 8 HQ Motion Deblur、TPKE for Robust Motion Deblur 和本文提出的算法的复原图像

通过 1.1 节的算法可得两幅图像的模糊方向为 90° , 模糊核大小分别为 15 像素和 21 像素. 分别使用 HQ Motion Deblur^[5] (HQ)、Two-Phase Kernel Estimation for Robust Motion Deblur^[14] (TPKE) 和提出的算法进行去模糊. 3 种方法得到的去模糊图像如图 8 所示, 其中图 8(a)~8(c) 分别为 3 种算法对圆孔图像的恢复结果, 图 8(e)~8(f) 为对直线阵列的恢复结果. 为便于观察, 在每幅图像中选取两部分放大, 列于图像右侧. 接着, 通过客观评价指标、去模糊前后对尺寸测量的影响和运行速度三方面进行效果评价.

3.3 客观评价指标

首先, 使用客观评价指标 PSNR 和 SSIM 比较不同算法恢复图像的效果.

1) 峰值信噪比 R_{PSNR} 是常用的衡量图像失真的指标, 值越大表明图像质量越好. 其计算公式为

$$R_{\text{PSNR}} = 10\lg (255)^2/R_{\text{MSE}}, \tag{13}$$
$$R_{\text{MSE}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y) - \hat{f}(x,y), \tag{14}$$

式中 R_{MSE} 为图像的均方误差.

2) 结构相似度 R_{SSIM} 用来衡量图像结构的完整性, 是常用的图像质量评价方法, 值越接近 1 越好. 其值通过滑动高斯窗口对图像分块, 并用高斯加权计算每个窗口的均值、方差和协方差得到. 每个块的 R_{SSIM} 计算公式为

$$R_{\text{SSIM}}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_2)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \tag{15}$$

Fig.8 Comparison of deblurred images by HQ Motion Deblur, TPKE for Robust Motion Deblur and the proposed algorithm
各参数值的选取见文献 [18]. 本文使用 MATLAB 提供的 SIMM 函数的默认参数进行计算. R_{PSNR} 和 R_{SSIM} 都需要比较变化前后的两幅图像, 这里的静止图像是通过反复移动位移台, 利用透明

贴图与模糊图像进行匹配得到. 计算所得的 R_{PSNR} 和 R_{SSIM} 见表 2. 要注意的是, 由于清晰和模糊这两幅图像无法同时拍摄, 因此其对应的被测区域无法完全一致, 所以这里 R_{PSNR} 和 R_{SSIM} 并非绝对量度, 而是用来衡量不同算法的恢复效果.

表 2 恢复图像的 R_{PSNR} 和 R_{SSIM}

Tab.2 The R_{PSNR} and R_{SSIM} of deblurred images

方法	R_{PSNR}		$R_{SSIM} / \%$	
	圆孔图像	直线阵列	圆孔图像	直线阵列
HQ	22.71	18.89	74.27	63.30
TPKE	23.81	21.86	79.25	77.51
Proposed	26.01	23.21	82.35	82.27

从表 2 可以看出, 提出方法的 R_{PSNR} 和 R_{SSIM} 值都优于 HQ 和 TPKE 方法. 这里的差异主要来自振铃效应. 对于圆孔图像, 如图 8(a)~8(c) 所示, HQ 和 TPKE 方法在整幅图的上边缘和圆孔内部都产生了振铃, 尤以内部最为明显. HQ 方法恢复图像的边缘较锐利, 但伪影也更明晰; 当圆孔较小的时候, 伪影占据了相当大的面积, 这会给尺寸测量带来困扰, 在稍后的实验也会看到这点. 而提出的算法几乎没有产生任何振铃效应, 圆孔内部亮度均匀一致, 且边缘较为清晰, 整体效果与原图最接近. 图 8(d)~8(f) 是沾染纤维污物的直线阵列的恢复结果, 可以评估去模糊图像对污染物检测的影响. 如图, HQ 和 TPKE 在物体边缘处产生了振铃, 明暗相间的条纹充斥了整张图片, 这些条纹很可能会被缺陷检测算法判断为划痕. HQ 算法依然保持锐利的边缘和清晰的伪影, 纤维污物四周的振铃可能会让缺陷检测算法扩大检测的范围, 或将纤维认作划痕. TPKE 方法边缘稍显模糊, 伪影也少一些. 提出的算法几乎没有产生任何振铃, 污物的边界完整清楚, 易于识别.

3.4 尺寸和坐标测量评价

因为工业图像经常用于工件的检测和定位, 故选取圆孔图像的第一列, 分析其直径和坐标在去模糊前后的变化. 如图 9 所示, 直方图为圆孔直径, 折线图为相对误差; 横坐标为圆孔标号 (由大到小). 可见, 当圆孔较大时, 3 种方法的差异很小, 与实际值十分接近, 相对误差在 1% 附近波动. 当圆孔直径缩小到 15 个像素左右时 (序号 8), 由于 HQ 和 TPKE 方法产生的伪影占据圆孔的空间变得十分可观, 影响到了二值化过程, 所以检测误差迅速增大到 6% 和 3%, 而提出的方法的误差没有变化, 仍小于 1%. 当圆孔直径继续减小到 8 个像素时, 提出算法的误差才开始变大, 但仍小于其他两种方法.

去模糊图对圆心坐标测量的影响, 分析结果如图 10 所示. 因为图像位移方向为 90° , 所以 X 坐标全程变化不大. 当圆孔较大时, 3 种方法测得的 Y 坐标误差都小于 0.3 像素; 当圆孔减小到 8 个像素 (序号 9) 时, HQ 和 TPKE 方法恢复图的测量误差分别为 0.8 像素和 0.51 像素; 而得益于良好的振铃抑制, 提出算法恢复图的误差仍然较小, 为 0.31 像素.

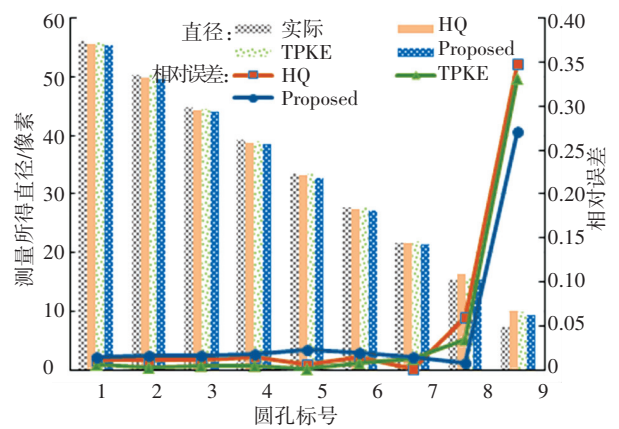


图 9 圆孔恢复图的直径测量结果

Fig.9 The diameter of the circular hole deblurred images

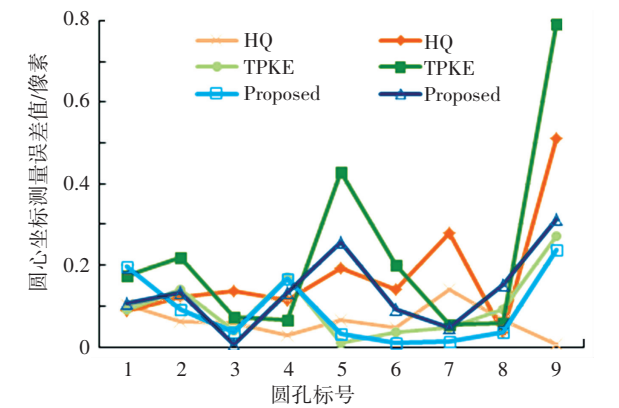


图 10 圆孔恢复图的圆心测量误差

Fig.10 The center measurement error of the circular hole deblurred images

由上可见, 在大尺度的图形上, 提出算法恢复图像的测量精度与另外两种算法差别不大; 而在小尺度图形上, 提出的算法具有优势, 满足工业测量所需要的稳定性. 模糊图及复原结果如图 11 所示.

3.5 运算速度

工业检测中通常需要实时处理, 对算法的执行时间较为敏感. 为评估运算速度, 在 i7-6700 平台, 8 G 内存, 使用 GPU 加速的计算机上, 使用 HQ、TPKE 和提出的方法恢复大小为 800 像素 $\times$ 600 像素, 8 位色深的 5 幅模糊程度不同的灰度图片, 耗时见表 3. 相比基于迭代的两种方法, 提出的算法耗时较少, 优势明显, 经过优化后可以做到实时处理.



图 11 Lena 模糊图及复原结果

Fig.11 Blurred "Lena" and the recovery result

表 3 3 种方法的运算时间

Tab.3 The running time of the 3 methods

方法	耗时/s				
	1#图	2#图	3#图	4#图	5#图
HQ	25.0	19.0	27.0	17.0	11.0
TPKE	13.8	12.7	14.3	11.5	7.6
Proposed	1.32	0.95	1.55	0.81	0.63

4 结 论

1)面向工业检测,提出了结合 R-L 滤波和引导滤波的运动图像去模糊方法,在保持工件清晰边缘的同时,去除振铃效应带来的伪影.实验结果表明,在客观评价指标、对尺寸测量的影响和运算速度方面,提出的方法具有优势.

2)为了提高速度,提出算法的去模糊部分使用了 R-L 滤波.如果对实时性无要求,或硬件计算能力强大,去模糊算法可以改为其他运算繁重但效果更好的算法,然后使用本方法的后续部分去除振铃模糊.在前述实验的直线阵列图像中,将 R-L 滤波改为 HQ 算法, R_{PSNR} 可从 18.89 提高到 25.07, R_{SSIM} 从 63.3%提高到 80.84%.

3)除工业检测外,本方法对纹理复杂的自然图像的恢复效果显著,可见,本方法对图像平缓区域附近的振铃抑制效果很好,缺点是在强边缘处引入了噪声,例如人物鼻子附近的斑点,这需要在今后的工作中进一步研究解决.

参考文献

[1] RAJAGOPALAN A N, CHELLAPPAR. Motion deblurring: algorithms and systems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 12

[2] TIWARI S, SHUKLA V P, SINGH A K. Review of motion blur estimation techniques [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 1 (4): 176

[3] RUIZ P, ZHOU Xu, MATEOS J, et al. Variational bayesian blind image deconvolution: A review [J]. Digital Signal Processing, 2015, 47: 116

[4] SCHMIDT U, ROTHER C, NOWOZIN S, et al. Discriminative non-blind deblurring [C]// CVPR. Portland: IEEE Computer Society, 2013

[5] SHAN Qi, JIA J, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image [C]//California: Acm transactions on graphics

(tog), 2008, 27(3): 73

[6] WIENER N. Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1949

[7] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. Journal of Astronomy, 1974, 79: 745

[8] DONATELLI M, ESTATICO C, MARTINELLI A. Improved image deblurring with anti-reflective boundary conditions and re-blurring [J]. Inverse Problems, 2006; 22(6): 2035

[9] 刘微.运动模糊图像恢复算法的研究与实现 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005

Liu Wei. Research and Implementation of Motion Blur Image Restoration Algorithm [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005

[10] LEVIN A, FERGUS R, DURAND R, et al. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 70

[11] XU L, JIA J. Two-phase kernel Estimation for robust motion deblurring [C]//European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 157

[12] MOGHADDAM M E, JAMZAD M. Finding point spread function of motion blur using radon transformation and modeling the motion length [C]//Proceedings of the Fourth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Rome: IEEE, 2004: 314

[13] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. Journal of optical society of America, 1972, V62, 55

[14] YITZHAKY Y, KOPEIKA N S. Identification of blur parameters from motion blurred images [J]. Graphical Models and Image Processing, 1997, 59(5): 310

[15] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35 (6): 1397

[16] 谢伟, 周玉钦, 游敏. 融合梯度信息的改进引导滤波 [J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(9): 1119

XIE Wei, Zhou Yuqin, You Min. Improved guided filtering with fusion gradient information [J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2016, 21(9): 1119

[17] 曹伟, 王华彬, 石军, 等. 基于边缘检测加权引导滤波的指静脉图像增强算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 166

CAO wei, WANG huabin, SHI Jun, et al. Finger vein image enhancement algorithm based on edge detection weighted guided filter [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2017, 54(2): 166

[18] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600

(编辑 魏希柱)