高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 31 卷 第 4 期
2017 年 8 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 31, No. 4
Aug., 2017

文章编号：1000-5773(2017)04-0426-07

高应变率变形图像去模糊及数字图像相关测量*

郭 翔，李玉龙，索 涛，刘慧芳，张 超

（西北工业大学航空学院，陕西西安 710072）

摘要：针对材料高应变率动态变形中的高速运动模糊图像，提出了一种基于加载分析的点扩散函数去模糊方法，通过对模糊像素进行卷积，有效地去除了试件高速变形过程中所产生的运动模糊。通过霍普金森杆加载实验验证了该方法的有效性，与原始模糊图像的对比表明，该方法可有效地恢复运动模糊图像，从而提高数字图像相关测量的准确性和稳定性。

关键词：动态变形；点扩散函数；数字图像相关；图像修复；霍普金森杆

中图分类号：O521.3；TG156 **文献标志码**：A

doi：10.11858/gywlxb.2017.00.011

1 引 言

材料的动态力学行为一直是工程应用领域关注的重要问题。尽管已有很多学者在该领域内进行研究，但是材料在高应变率动态变形过程中的实验测量问题仍阻碍着材料和力学研究的更深入进行[1]。在实际测量中，一个主要的问题就是如何准确测量高应变率变形过程中的试件应变场[2]。数字图像相关技术[3]作为一种非接触测量手段，目前已经在航空、航天、材料、机械等领域获得了广泛的应用[4]。

高速成像技术作为科学研究的重要实验手段已获得了大量的应用[5-10]。20 世纪 90 年代，多通道高速成像相机被研制成功，通过光束分隔的方式实现了多 CCD 传感器的高速采集[11]。其后，随着 CMOS 传感器技术的日益成熟[12]，高速相机的图像质量和采集速度大幅度地提升[13-15]。但是，对于高速成像技术而言，仍有一个无法回避的矛盾存在，即图像空间分辨率与图像采集速度之间的矛盾。因此，在很多测量应用中，往往选择降低分辨率的方式提高采集帧频[16]，但低分辨率的图像会导致测量结果的精度损失。

本研究采用 uCMOS 光学传感器的超高速相机，其最大采集频率为每秒 5 百万帧，对应的图像分辨率为 924×768 像素[16]，但一次测量仅能够采集 180 帧图像，同时，较快的采集频率限制了所采集图像的质量[17]。然而，即使超高速相机的采集速度高达每秒 5 百万帧，由于试件在实验过程中，伴随着变形，还有很大的刚体运动速度，加上镜头的放大作用，模糊区域仍是不可避免的。因此，如何解决高应变率变形图像的模糊问题成为材料动态力学行为研究亟需解决的问题。

运动模糊的产生主要是由于在相机曝光周期中，相机和物体间发生了较大的相对运动。目前对于运动模糊图像的修复方法主要有点扩散函数（Point Spread Function，PSF）法和非盲反卷积方法[18]。PSF 方法是定义模糊核的运动函数，对图像进行去模糊运算。反卷积法是对模糊图像的修复。很多研究者对于 PSF 的迭代优化进行了深入的研究[19-21]。然而，对于数字图像相关测量而言，图像畸变的修正更为重要[22]。一般的基于图像去模糊方法主要针对已知的固定图像，缺乏对散斑特征的去模糊研究，因此迫切需要研究对高应变率动态变形图像的去模糊方法。

* **收稿日期**：2017-01-11；**修回日期**：2017-02-24

基金项目：国家自然科学基金青年基金(11602201)

作者简介：郭 翔(1984—)，男，博士，博士后，主要从事光学测量研究. E-mail：guoxiang1984@nwpu.edu.cn

通讯作者：李玉龙(1961—)，男，博士，教授，主要从事冲击动力学研究. E-mail：liyulong@nwpu.edu.cn

© 2017 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics

本研究提出了一种高应变率动态变形图像的去模糊方法。针对动态变形过程估计点扩散函数,从而进行反卷积运算达到去模糊的目的。采用霍普金森杆进行实验比较,以检验该方法的可靠性。

需要说明的是,本研究所针对的运动模糊主要产生于试件在高速变形过程中的高速运动,模糊特征为散斑图像,与现有的针对相机振动等问题引起的运动模糊研究有显著的区别。

2　高应变率动态变形图像去模糊

如图 1 所示,由于变形过程中的高应变,图像中不可避免存在模糊区域。模糊区域将影响数字图像相关计算的稳定性和准确性。基于对动态变形过程的分析可以发现,在动态变形图像采集过程中,运动模糊是造成图像模糊的首要原因。

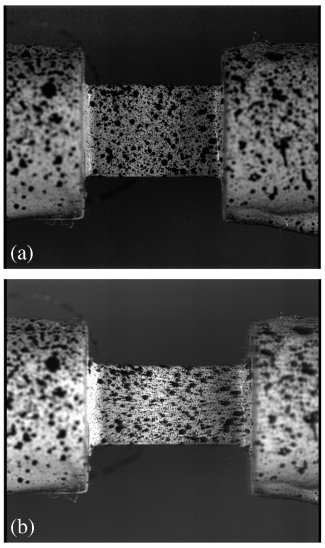

图 1　动态变形模糊图像
((a) 参考图像;(b) 模糊图像)

Fig. 1　Blurry image in dynamic deformation
((a) Reference image;(b) Blurry image)

动态 PSF 估计方法是一种对变形过程的开环估计方法。通过对成像系统和被测物体的运动进行估计,建立相对运动的函数,从而进行反卷积运算消除图像的模糊问题。在高速/超高速相机采集过程中,空间的运动可以被表征为 m 自由度的 n 阶系统

$$\dot{\boldsymbol{X}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(t)+\sum_{i=0}^{n-1}[\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i(t-t_i)] \tag{1}$$

$$\boldsymbol{Y}(t)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}(t)+\sum_{i=0}^{n-1}[\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}_i(t-t_i)] \tag{2}$$

$$\boldsymbol{u}_i(t-t_i)=\boldsymbol{A}_i\delta(t-t_i)\quad(i=0,1,\cdots,n) \tag{3}$$

$$t_0=0 \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{X}(t)\in\mathbf{R}^{n\times1}$,$\boldsymbol{u}_i(t)\in\mathbf{R}^{m\times1}$,$\boldsymbol{Y}(t)\in\mathbf{R}^{m\times1}$,$\boldsymbol{A}\in\mathbf{R}^{n\times n}$,$\boldsymbol{B}\in\mathbf{R}^{n\times m}$,$\boldsymbol{C}\in\mathbf{R}^{m\times n}$,$\boldsymbol{D}\in\mathbf{R}^{m\times m}$;$\boldsymbol{X}(t)$是系统的特征向量,$\boldsymbol{u}(t)$是系统的输入向量,$\boldsymbol{Y}(t)$是系统的输出向量,$\boldsymbol{A}$ 是系统的特征矩阵,$\boldsymbol{B}$ 是系统的输入矩阵,$\boldsymbol{C}$ 是系统的输出矩阵,$\boldsymbol{D}$ 是系统的传递矩阵,$\delta(t)$ 是系统的输入函数,$\boldsymbol{A}_i$ 是 i 阶输入的幅值,t_i 是 i 阶的输入时间。试件的运动参数可以用(1)式～(4)式进行表征。PSF 方法描述了试件随时刻 t 的运动路径。

如图 2 所示,在动态加载过程中,变形可以被定义为阶跃响应[23-24]。使用二阶线性系统表示可得传递函数为

$$G(s)=e_r/(s^2+2\zeta\omega_n+\omega_n^2) \tag{5}$$

式中:e_r 为系统残差,ω_n 为系统的自然频率,ζ 为系统的阻尼因子。

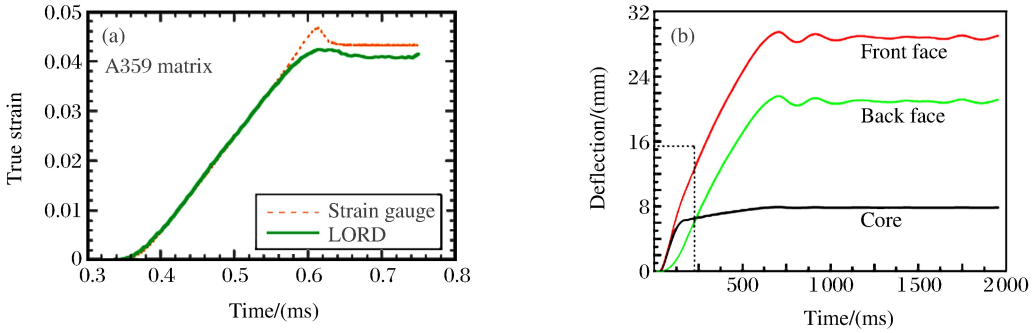

图 2　典型动态加载过程((a)动态压缩中的应变[25];(b) 爆炸冲击中的位移[26])

Fig. 2　Typical dynamic deformation processes ((a) Strain measured in a tension Kolsky bar expriment[25];
(b) Displacement-time history in a blast impact expriment[26])

试件的运动可以用应变率 $\dot{\varepsilon}$、试件标距长度 L_0 和泊松比 γ 表示，因此，(1)式、(2)式中的参数可以表示为

$$\omega_n=\omega_n(\dot{\varepsilon},L_0),\quad \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0\\ e_r\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{C}=[1\quad \gamma],\quad \boldsymbol{D}=0$$

在霍普金森杆加载实验中，试件的运动可以被表征为一个自由度的二阶运动。通过求解系统方程得到系统的时间响应为

$$M_o(t)=\sum_{i=1}^{n}\frac{A_i e_r}{\omega_n^2}\left[1-e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)}\cos\omega_d(t-t_i)+\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin\omega_d(t-t_i)\right]u(t-t_i) \tag{6}$$

式中：A_i 为第 i 步的输入值，t_i 为第 i 步的输入时间，n 为系统的幅值响应个数，ω_d 为阻尼频率。

通过(6)式可以表征试件的运动函数，函数中的参数可以根据实验加载数据确定。则像素($\boldsymbol{x}$,$\boldsymbol{y}$)所对应的核函数为

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\boldsymbol{L}\int_{t_a}^{t_b}M_o(t)\mathrm{d}t\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{L}$ 为模糊核的转换因子，t_a 和 t_b 分别是采集图像的起始和结束曝光时间，$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}$ 是 $\boldsymbol{x}$ 的转置。

因此，一幅采集到的含有模糊区域的图像 $\boldsymbol{O}$ 可以被表征为

$$\boldsymbol{O}=\boldsymbol{K}\otimes\boldsymbol{I}+\boldsymbol{N} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{K}\in\mathbf{R}^{l\times l}$；$\boldsymbol{O}$,$\boldsymbol{N}$,$\boldsymbol{I}\in\mathbf{R}^{w\times h}$；$\boldsymbol{K}$ 为模糊核函数；$\boldsymbol{I}$ 为理想图像；$\boldsymbol{N}$ 为系统噪声；w 为图像宽度；h 为图像高度；l 为模糊核函数的长度；算符“⊗”表示卷积运算。

因此，理想图像可以通过对采集图像的反卷积运算求取。本研究在多种反卷积算法中选取了最常用的 Richardson-Lucy 反卷积方法进行运算。该方法可表示为[27]

$$\boldsymbol{I}^{n+1}=\left(\frac{\boldsymbol{O}}{\boldsymbol{I}^n\otimes\boldsymbol{K}}\otimes\hat{\boldsymbol{K}}\right)\boldsymbol{I}^n \tag{9}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{K}}$ 是扩散核。这一反卷积计算方法可使用图形处理器(Graphics Processing Unit，GPU)编程计算以提高效率。

如图 3 所示，本研究提出的去模糊方法可以有效去除运动模糊对于采集图像的影响。

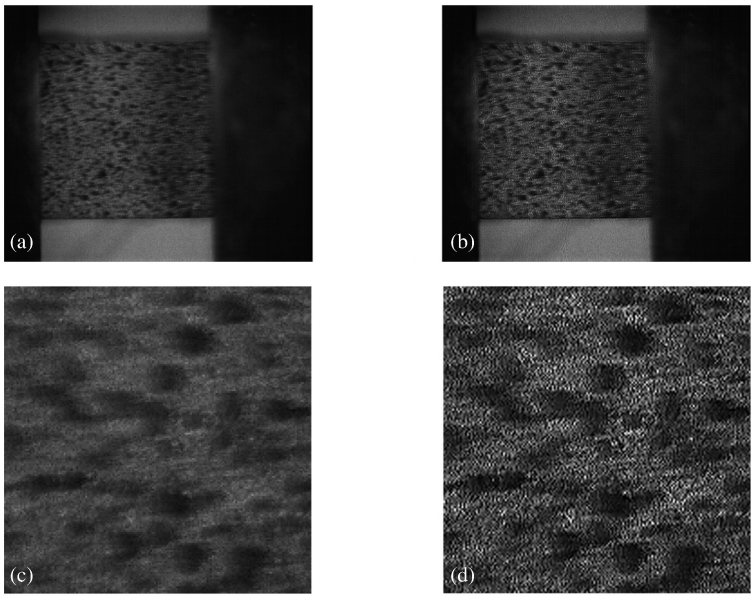

图 3 去模糊结果((a) 模糊图像；(b) 去模糊图像；(c) 模糊图像子区；(d) 对应去模糊图像子区)

Fig. 3 Deblurring result ((a) Blurry image; (b) Deblurred image by the proposed method; (c) Subset of blurry image; (d) Subset of deblurred image)

3　实验验证

为了验证所提出方法的有效性,使用霍普金森拉杆(见图 4)实验进行验证。试件尺寸如图 5 所示。

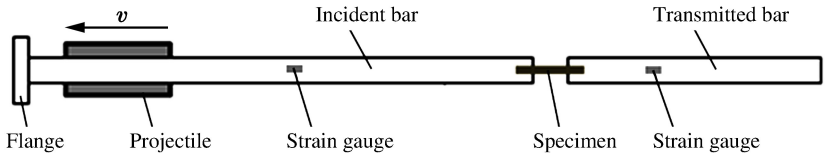

图 4　霍普金森拉杆模型

Fig. 4　Schematic of split Hopkinson tensile bar

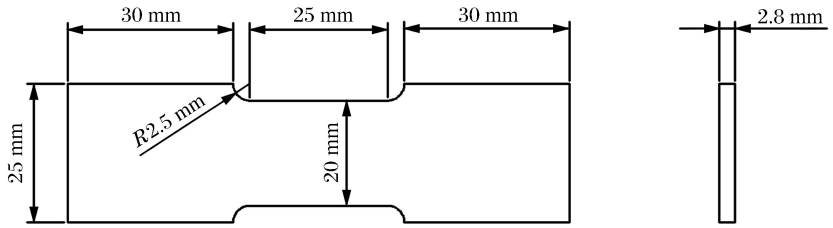

图 5　试件尺寸

Fig. 5　Specifications of experimental specimen

采用长 1.2 m、直径 25 mm 的入射杆和透射杆,在两杆中间位置粘贴应变片,波速为 5 000 m/s。使用气炮冲击套管撞击法兰产生拉伸波,实验曲线如图 6 所示。

在变形过程中,在入射杆端方向存在模糊区域,如图 7 所示。使用我们提出的方法对模糊位置进行去模糊处理,结果如图 8 所示。

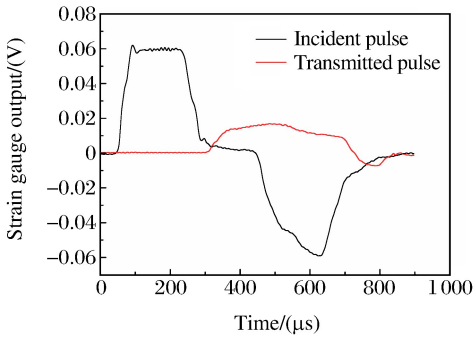

图 6　实验曲线

Fig. 6　Typical pulses from strain gauges

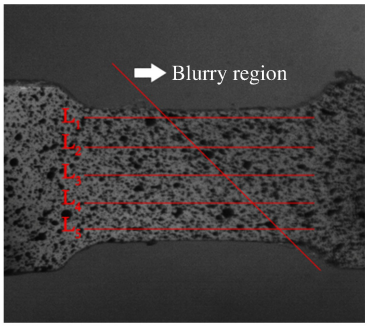

图 7　模糊区域

Fig. 7　Blurry region in the image

由图 8 可见,本研究方法可以有效去除运动模糊的影响,提高图像质量。比较原始图像和去模糊图像的应变计算结果,如图 9 所示,可见,根据去模糊图像计算的应变数据更为连续光滑,而原始图像在模糊区域内的应变结果存在明显的波动。

对整个高应变率动态变形过程进行处理,获得整个变形过程的应变场结果,如图 10 所示。在变形状态 1→3 中,应变分布均匀;在应变状态 3→4 中,试件存在颈缩。这一结果与试件变形过程一致。采用一波法进行数据处理分析[28-33],将散斑计算结果与应变片计算结果进行比较,如图 11 所示,二者一致,证实了本研究方法的有效性。综上所述,通过霍普金森拉杆实验证明:采用本研究提出的方法对图像进行去模糊处理后,测量得到的结果正确,且有效消除了高速变形过程中的图像模糊。

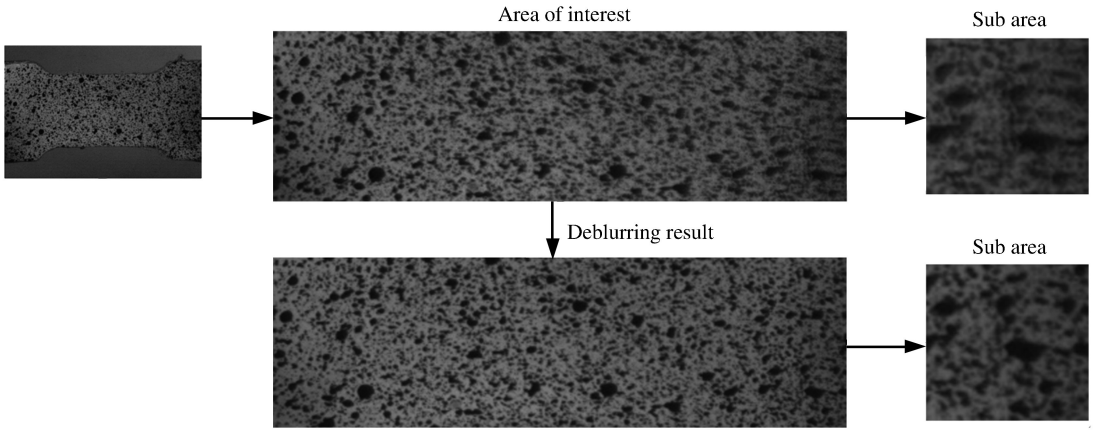

图 8 对模糊区域进行去模糊处理

Fig. 8 Deblurred result by the proposed method

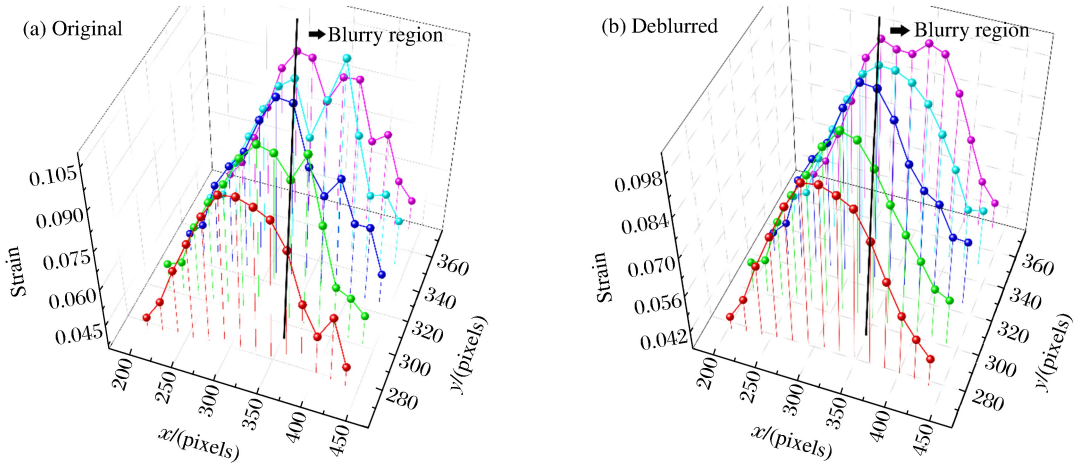

图 9 原始图像和去模糊图像的应变计算结果比较

Fig. 9 Strain results of specimen calculated by original and deblurred images

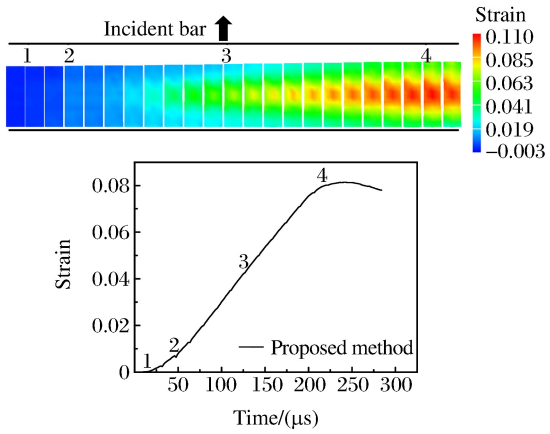

图 10 整个变形过程中的应变场

Fig. 10 Experimental results of specimen under the impact of Hopkinson tensile bar

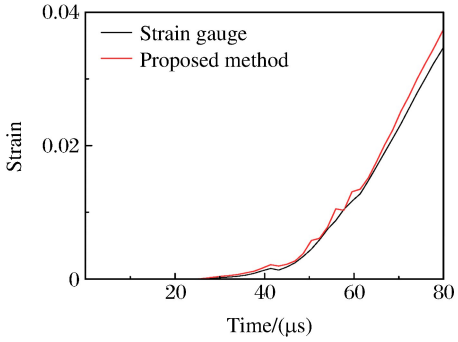

图 11 散斑及应变片结果比较

Fig. 11 Experimental results of specimen measured by the proposed method and the strain gauges

4 结　论

针对材料在高应变率动态变形中的高速运动模糊图像,提出了一种基于加载分析的点扩散函数去模糊方法,通过对模糊像素进行卷积,有效地去除了高速运动所产生的运动模糊问题。采用霍普金森杆加载实验验证该方法的有效性,原始模糊图像和去模糊图像的对比表明,本方法可有效地恢复运动模糊图像,从而提高数字图像相关测量的准确性和稳定性。

References:

[1] ROSSI M, PIERRON F, FORQUIN P. Assessment of the metrological performance of an *in situ* storage image sensor ultra-high speed camera for full-field deformation measurements [J]. Meas Sci Technol, 2014, 25(2): 025401.

[2] PANKOW M, JUSTUSSON B, WAAS A M. Three-dimensional digital image correlation technique using single high-speed camera for measuring large out-of-plane displacements at high framing rates [J]. Appl Opt, 2010, 49(17): 3418-3427.

[3] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. Exp Mech, 1985, 25(3): 232-244.

[4] JIANG L, XIE H, PAN B. Speeding up digital image correlation computation using the integral image technique [J]. Opt Laser Eng, 2015, 65: 117-122.

[5] PIERRON F, SUTTON M A, TIWARI V. Ultra high speed DIC and virtual fields method analysis of a three point bending impact test on an aluminium bar [J]. Exp Mech, 2011, 51(4): 537-563.

[6] MAENO S, WANG J, FUKUDA S, et al. Observation and analysis of microbubble motion induced by an underwater shock wave [C]//29th International Symposium on Shock Waves 2. Springer International Publishing, 2015.

[7] YIN L, SHAO Y M, LIU J, et al. Impact damage evaluation method of friction disc based on high-speed photography and tooth-root stress coupling [J]. J Phys Conf Ser, 2015, 628(1): 012085.

[8] HIJAZI A, MADHAVAN V. A novel ultra-high speed camera for digital image processing applications [J]. Meas Sci Technol, 2008, 19: 0855038.

[9] DESPREZ T F, DOMAS S. Deformation of the globe under high-speed impact: its relation to contusion injuries [J]. J Econ Dyn Control, 1986(1/2): 163-165.

[10] JIANG X G, WANG Y, YANG Z Y, et al. Time-resolved measure technique for electron beam envelope basing on synchronous framing and streaking principle [J]. Ads Abstract Service, 2015.

[11] SIEMROTH P, SCHULKE T, WITKE T. Microscopic high speed investigations of vacuum arc cathode spots [J]. IEEE Trans Plas Sci, 1995, 23(6): 919-925.

[12] MENDIS S, KEMENY S E, FOSSUM E R. CMOS active pixel image sensor [J]. IEEE T Electron Dev, 1994, 41(3): 452-453.

[13] KRYMSKI A, VAN BLERKOM D, ANDERSSON A, et al. A high speed, 500 frames/s, 1024×1024 CMOS active pixel sensor [C]//1999 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers. IEEE, 1999.

[14] NISHIKAWA Y, KAWAHITO S, FURUTA M, et al. A high-speed CMOS image sensor with on-chip parallel image compression circuits [C]//IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2007.

[15] CREMERS B, AGARWAL M, WALSCHAP T, et al. A high speed pipelined snapshot CMOS image sensor with 6.4 Gpixel/s data rate [C]//International Image Sensor Workshop. Bergen, 2009.

[16] CROOKS J, MARSH B, TURCHETTA R, et al. Kirana: a solid-state megapixel uCMOS image sensor for ultra-high speed imaging [C]//IS&T/SPIE Electronic Imaging, 2013.

[17] HONOUR J. A brief history of principles used in high speed cameras [J]. Imag Sci J, 2009, 57(6): 303-316.

[18] KIM M D, UEDA J. Real-time image de-blurring and image processing for a robotic vision system [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.

[19] MISKIN J, MACKAY D J. Ensemble learning for blind image separation and deconvolution [M]//Advances in Independent Component Analysis. Springer, 2000: 123-141.

[20] FERGUS R,SINGH B,HERTZMANN A,et al. Removing camera shake from a single photograph [C]//ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM,2006.
[21] SHAN Q,JIA J,AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image [C]//ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM,2008.
[22] TIWARI V,SUTTON M A,MCNEILL S R. Assessment of high speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements:methodology development and validation [J]. Exp Mech,2007,47(4):561-579.
[23] KAILATH T. Linear systems [M]. Englewood Cliffs:Prentice-Hall,1982.
[24] CHEN C T. Linear system thoery and design [M]. Oxford University Press,1995.
[25] LI Y,RAMESH K T. An optical technique for measurement of material properties in the tension Kolsky bar [J]. Int J Impact Eng,2007,34(4):784-798.
[26] ZHU F,ZHAO L,LU G,et al. A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels [J]. Int J Impact Eng,2009,36(5):687-699.
[27] RICHARDSON W H. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. JOSA,1972,62(1):55-59.
[28] GRAY G T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing [M]//ASM handbook. Ohio:ASM International,Materials Park,2000:462-476.
[29] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials [M]. John Wiley & Sons,1994.
[30] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proc Phys Soc B,1949,62(11):676.
[31] 陈 荣,卢芳云,林玉亮,等. 分离式 Hopkinson 压杆实验技术研究进展 [J]. 力学进展,2009,39(5):576-587.
CHEN R,LU F Y,LIN Y L,et al. A critical review of split Hopkinson pressure bar technique [J]. Advances in Mechanics,2009,39(5):576-587.
[32] 段祝平,孙琦清,杨大光,等. 高应变率下金属动力学性能的实验与理论研究——一维杆的实验方法及其应用 [J]. 力学进展,1980,10(1):3-18.
[33] 范亚夫,魏延鹏,薛跃军,等. 数字图像相关测试技术在霍普金森杆加载实验中的应用 [J]. 实验力学,2015,30(5):590-598.
FAN Y F,WEI Y P,XUE Y J,et al. On the application of digital image correlation testing technology in Hopkinson bar loading [J]. Journal of Experimental Mechanics,2015,30(5):590-598.

Dynamic Deformation Image Deblurring and Image Processing for Digital Imaging Correlation Measurement

GUO Xiang,LI Yu-Long,SUO Tao,LIU Hui-Fang,ZHANG Chao

(*School of Aeronautics,Northwestern Polytechnical University,Xi'an* 710072,*China*)

Abstract:In this research,we proposed a method for deblurring of images captured in the dynamic deformation of materials. By this method,deblurring was achieved based on a dynamic-based approach,which was used to estimate the point spread function (PSF) during the camera exposure window. The deconvolution process involving the iterative matrix calculations of pixels was then performed on the graphics processing unit (GPU) to reduce the time cost. The proposed method was evaluated using the Hopkinson bar loading system. In comparison with the blurry image,the proposed method successfully restored the image. It is also demonstrated from the image processing applications that the deblurring method can improve the accuracy and the stability of the digital imaging correlation measurement.

Key words:dynamic deformation;point spread function (PSF);digital image correlation;image restoration;Hopkinson bar