

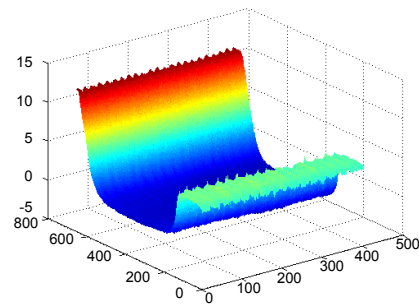


基于 PMP 的钢轨三维形貌在线测量模糊条纹复原

袁宏翔¹, 李金龙^{1*}, 罗鹏², 高晓蓉¹

¹西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031;

²西华师范大学电子信息工程学院, 四川南充 637009



摘要: 在线相位测量轮廓术(PMP)中, 当被测物体运动速度较高时, 所采集的变形条纹往往为运动模糊图像, 使得复原误差增大, 严重时可能导致三维重建无法进行。将在线 PMP 运用于钢轨外形及表面缺陷的在线三维测量时, 为了实现钢轨表面模糊变形条纹的清晰化, 本文对维纳滤波法、点扩散函数算法、盲解卷积算法和 Richardson-Lucy 算法等几种模糊图像复原算法进行了对比分析, 用峰值信噪比对模糊条纹图像的复原效果进行评估。同时, 研究了车辆运行速度和图像复原效果之间的关系, 得出了复原效果与运行速度之间的关系曲线, 进行了误差分析, 并在线 PMP 实现了钢轨外形的三维重建。理论及实验结果表明: 在对钢轨外形轮廓及表面缺陷的在线三维测量时, Richardson-Lucy 算法的复原效果最佳, 图像复原程度与车辆运行速度呈多项式关系。

关键词: 变形条纹; 模糊图像复原; Richardson-Lucy 算法; 峰值信噪比

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Image restoration for blurred fringes of rail profile 3D online measurement based on PMP

Hongxiang Yuan¹, Jinlong Li^{1*}, Peng Luo² and Xiaorong Gao¹

¹School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ²School of Electronic Information Engineering, West China Normal University, Nanchong 637009, China

Abstract: In online phase measurement profilometry (PMP), when the velocity of the object is quite high, the collected reformed fringes often appear to be motion-blurred images, which increases the measurement error, or even leads to the 3D reconstruction failure. In the online PMP 3D measurement of rail shape and surface flaw, in order to clarify the blurred reformed fringes of the rail, several restoration methods, such as Wiener Filtering, Point Spread Function algorithm, Blind Deconvolution algorithm, and Richardson-Lucy algorithm were compared and analyzed. And the peak signal to noise ratio (PSNR) is used for evaluating the restoration effect. Meanwhile, the relationship between the vehicle speed and the restoration effect was studied, the error was analyzed and the 3D rail shape was reconstructed based on online PMP. Theoretical and experimental results show that in the online 3D measurement of rail shape and surface flaw, the Richardson-Lucy algorithm is the best one for image restoration of motion blur, and the relationship between the effect of image restoration and the vehicle speed is a polynomial.

Keywords: deformed fringe; blurred image restoration; Richardson-Lucy algorithm; PSNR

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.07.005

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(7): 695–700

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-05-24

*E-mail: jinlong_lee@126.com

1 引言

在轨道交通中,钢轨起到支撑和引导车辆运行的作用。然而在车辆的运行过程中,钢轨受到的压力和摩擦力易导致磨损和变形。当钢轨磨损和变形到达一定程度时,会给车辆的运行带来安全隐患^[1]。

钢轨外形及表面缺陷的测量成为铁路行业的研究热点。近年来,基于条纹投影的三维测量技术逐渐引入钢轨外形及表面缺陷在线测量中,如傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FTP)^[2]、相位测量轮廓术(phase measurement profilometry, PMP)^[3]、小波变换轮廓术(wavelet transform profilometry, WTP)^[4]等。然而在变形条纹图像的在线采集过程中,噪声和运动模糊是测量误差的主要来源,严重时可能导致三维重建无法进行。因此,运动模糊图像的复原技术^[5]受到学者们的广泛关注。上世纪四十年代,曾提出了维纳滤波器^[6]的方法;七十年代,Richardson和Lucy两位学者在贝叶斯理论的基础上,采取迭代的方法实现运动模糊图像的复原,即Richardson-Lucy滤波去卷积算法^[7];另外还出现了多种估计运动模糊的方法,如点扩散函数算法、盲解卷积算法^[8,9]等。在基于条纹投影的三维测量中,PMP以其精度高、便于在线测量等优点而适于钢轨的三维在线测量^[10]。

本文采用多种图像复原方法对在线获取的钢轨表面变形条纹模糊图像进行复原,并用峰值信噪比对图像质量进行评估,同时也研究了图像复原程度与车辆运行速度之间的关系,进行误差分析,并采用在线PMP实现钢轨外形的三维重建。

2 基本原理

2.1 PMP原理

PMP是三维面形测量中很重要的一种方法,其原理如图1所示。

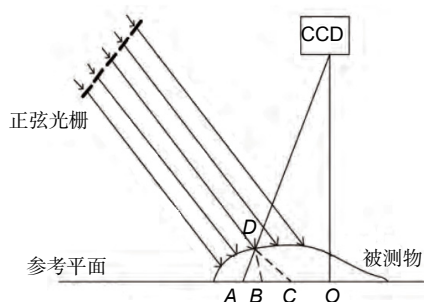


图1 PMP基本原理。

Fig. 1 Basic principle of PMP.

将一个正弦光栅投影到三维物体的表面,采集到的变形条纹可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y)], \quad (1)$$

其中: $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为光场强度调制, $\Phi(x, y)$ 为调制光场的位相分布。求解 $\Phi(x, y)$ 至少需要三帧变形条纹图样。为了获取被测物体连续的表面高度,需要采用相位展开算法^[3]将截断相位恢复成连续的相位函数。所以通过复原的条纹图像可以对物体进行三维测量及重建。

2.2 维纳滤波法

维纳滤波器采用自适应最小均方误差的统计方法,根据图像信号和噪声的相关矩阵及图像的局部方差,调整滤波器的输出^[6],使得均方误差最小。通过维纳滤波器的结果只是在平均意义上最优的结果^[11]。在模糊条纹图像复原的过程中,维纳滤波法可以最大程度地过滤噪声并且使图像变得平滑。

2.3 点扩散函数算法

在空间光学的成像模型中,点扩散函数是光学脉冲信号经过光学成像系统之后所得图像^[8]。对于匀速直线运动造成的模糊图像,图像复原程度的关键在于点扩散函数的准确估计程度。只要得出模糊核长度与运动模糊方向角度,便可以得到点扩散函数的具体表达形式。

2.4 盲解卷积算法

当无法准确地估计点扩散函数时,盲解卷积算法可以在只知道模糊图像的数据情况下对模糊图像进行复原^[9]。其原理是根据已知信息,再结合附加条件而形成复原模糊图像的约束条件,从而获得准确的估计复原图像。在实际中,造成运动模糊图像的原因不可能完全知道,所以可以采用在运动方向上建立盲解卷积算法。利用霍夫变换等变换确定运动模糊方向角度,再根据自相关函数计算模糊核长度从而得到复原图像。

2.5 Richardson-Lucy 算法原理

当模糊图像服从泊松分布时,使用最大似然法对原始图像进行估计,迭代方程为

$$f(x, y)^{k+1} = f(x, y)^k \left\{ \frac{g(x, y)}{h(x, y) * f(x, y)^k} \right\} \oplus h(x, y), \quad (2)$$

其中:第 k 次迭代结果为 $f(x, y)^k$,第 $k+1$ 次迭代结果为 $f(x, y)^{k+1}$,点扩散函数为 $h(x, y)$,模糊图像为

$g(x, y)^{[12]}$ 。随着 k 的增大, 第 $k+1$ 次迭代所得的估计结果 $f(x, y)^{k+1}$ 将更加收敛于原始图像 $f(x, y)$, 即可得到一个估计清晰的图像。在迭代过程中, 噪声也会随之放大而使得图像质量下降, 所以 RL 算法对于复原无噪声的模糊图像, 可以达到一个较好的复原效果。在匀速直线运动过程中, 主要造成的是图像运动模糊, 所以 RL 算法在对模糊图像进行合适次数的迭代后可以得到一个复原程度较好的估计原始图像。

3 仿真与误差分析

3.1 计算机仿真

首先利用软件平台生成标准正弦光栅条纹图像(图 2), 再对标准正弦光栅条纹图像进行运动模糊处

理, 令模糊核长度为 8, 得到运动模糊的光栅条纹图像, 如图 3 所示。

分别采用四种方法对图 3 所示的运动模糊光栅条纹图像进行复原如图 4 所示, 图 4(a)为维纳滤波法复原图像, 图 4(b)为点扩散函数算法复原图像, 图 4(c)为盲解卷积算法复原图像, 图 4(d)为 Richardson-Lucy 算法复原图像。

采用峰值信噪比(peak signal noise ratio, PSNR)对复原后的图像质量进行评价, 峰值信噪比越高, 表明图像质量越好, 其计算公式为

$$PSNR = 10 \times \lg \left(\frac{255^2}{MSE} \right), \quad (3)$$

其中 MSE 为均方误差。

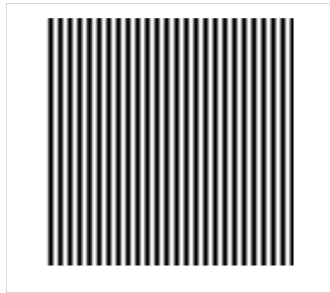


图 2 标准正弦光栅条纹.

Fig. 2 Standard sine grating fringes image.

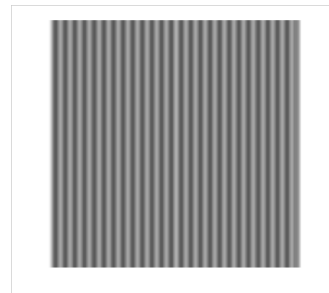


图 3 运动模糊的光栅条纹.

Fig. 3 Motion blurred grating fringes image.

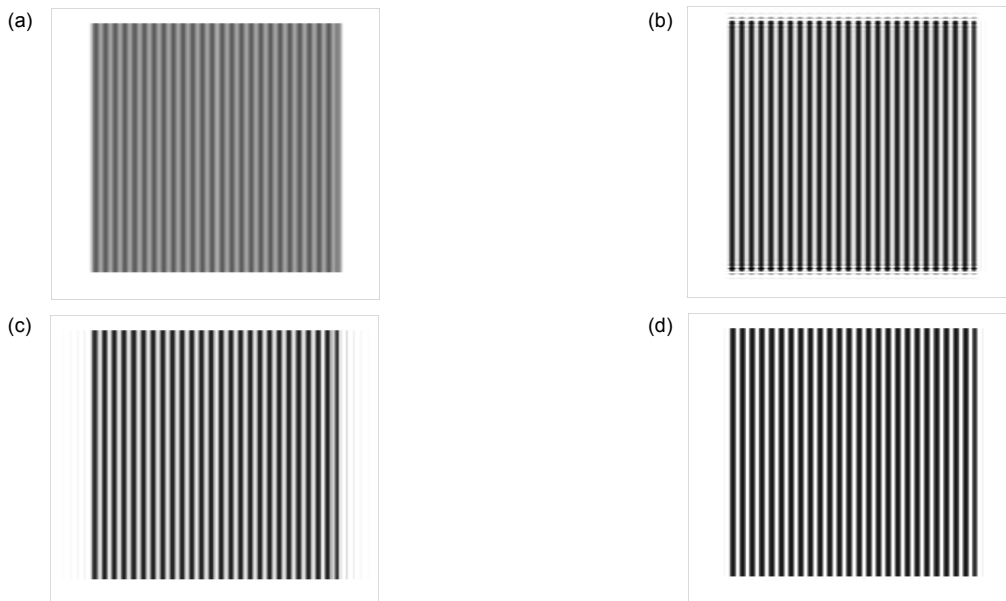


图 4 各种算法的光栅条纹图像复原图. (a) 维纳滤波法. (b) 点扩散函数算法. (c) 盲解卷积算法.

(d) Richardson-Lucy 算法.

Fig. 4 Restored grating fringes images of various algorithms. (a) Wiener filtering method. (b) Point spread function algorithm. (c) Blind deconvolution algorithm. (d) Richardson-Lucy algorithm.

利用上式计算可得模糊图像原图(图3)的PSNR值为18.3464。分别采用四种方法复原后,图4(a)~4(d)的PSNR值分别为:18.8544,21.8624,23.9749,27.9359。可见,对于运动模糊的条纹图像而言,Richardson-Lucy算法的复原效果最佳,因此本文采用Richardson-Lucy算法分析图像复原程度与车辆运行速度的关系,并用该算法对钢轨表面的模糊变形条纹图像进行复原,以实现钢轨外形轮廓及表面缺陷的三维在线测量。

3.2 数据及误差分析

对标准正弦光栅条纹图像加上不同模糊核长度的运动模糊处理,依次求得峰值信噪比,模糊图像的峰值信噪比(y)与模糊核长度(x)的关系如图5(a)所示。关系式为

$$y = -0.0017x^3 + 0.1297x^2 - 3.4729x + 38.663. \quad (4)$$

使用Richardson-Lucy算法依次对不同模糊核长度的模糊图像进行复原并求得峰值信噪比,复原图像的峰值信噪比(y)与模糊核长度(x)的关系如图5(b)所示。关系式为

$$y = 0.0008x^3 + 0.0277x^2 - 2.5958x + 44.593. \quad (5)$$

根据坐标点对关系式进行曲线拟合,发现图像复原程度与模糊核长度只满足多次式关系。

而模糊核长度与车辆运行速度的关系式为

$$v = \frac{x}{t}, \quad (6)$$

其中: v 为车辆运行速度, x 为模糊核长度, t 为相机曝光时间。相机曝光时间一定时,车辆运行速度与模糊核长度成正比,所以图像复原程度与车辆运行速度也呈多次式关系。

并且,车辆运行时,常伴随上下颠簸振动,也是造成图像模糊的一个主要原因,需对其进行误差分析。在任意方向的振动可以视为在此方向上存在一个速度,该速度与车辆运行的水平速度合成得到一个合速度,若合速度与水平方向的夹角为 θ ,即运动模糊方向角度,模糊核的方向与水平方向的夹角同样为 θ 。可以得到:

$$x' = \frac{x}{\cos \theta}, \quad (7)$$

其中: x 为水平方向的模糊核长度, x' 为合速度方向的模糊核长度。可见, θ 越大,图像的复原程度越低。

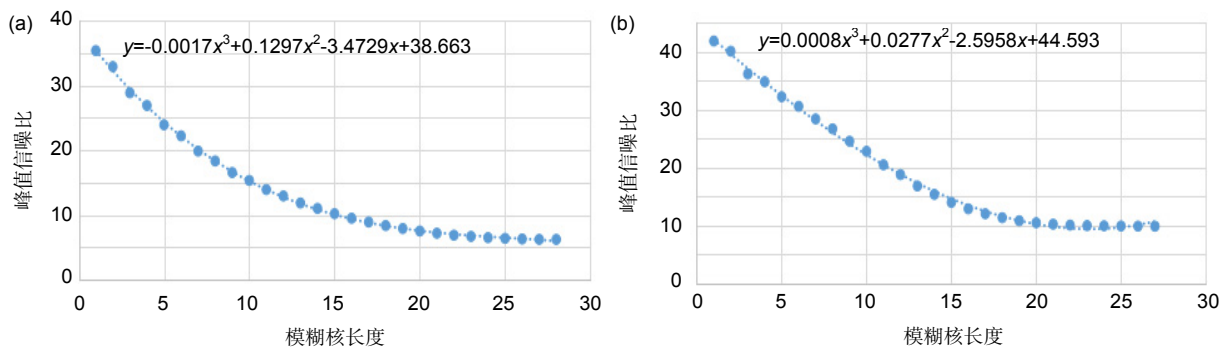


图5 峰值信噪比与模糊核长度的关系。(a) 模糊图像。(b) 复原图像。

Fig. 5 The relationship between peak signal-to-noise ratio and fuzzy kernel length. (a) Blurred images. (b) Restored images.

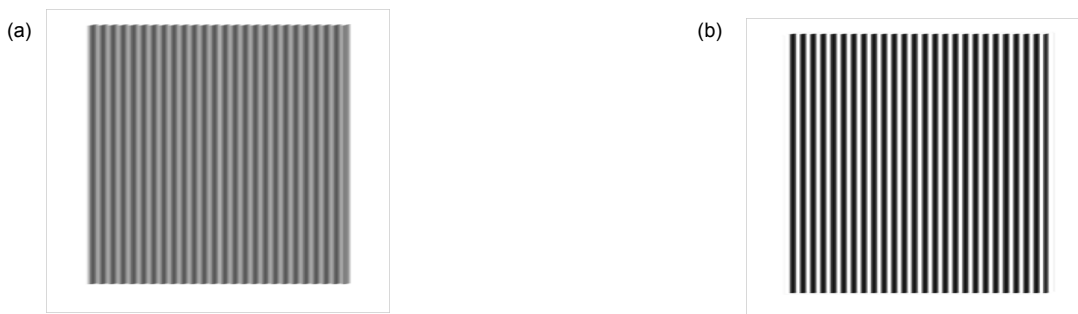


图6 $\theta=10^\circ$ 时光栅条纹图像。(a) 运动模糊图像。(b) Richardson-Lucy 算法的复原图。

Fig. 6 The grating fringes image when $\theta=10^\circ$. (a) Motion blurred image. (b) Restored image of the Richardson-Lucy algorithm.

当 $\theta = 10^\circ$ 时, 运动模糊的光栅条纹图像如图 6(a) 所示。采用 Richardson-Lucy 算法复原后的图像如图 6(b) 所示, 其 PSNR 值为 27.3497。所以当 $\theta = 10^\circ$ 时, 其误差为 2.1%。当角度依次为 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 时, 误差分别为 4.7%、8.1%、12.3%、17.2%、22.7%、28.7%、35.9%。可见, 为了控制误差, 需要将角度控制在 10° 以下。如果其他方向的振动过大而导致合速度与水平方向的夹角过大, 会给复原结果带来较大的误差, 即图像复原效果会大为下降, 从而影响钢轨三维形貌重建的结果, 继而增大缺陷的测量误差。

复原图像的峰值信噪比与模糊核长度的关系如图 7 所示。其关系式为

$$y = 0.0008x^3 + 0.0276x^2 - 2.5748x + 44.537. \quad (8)$$

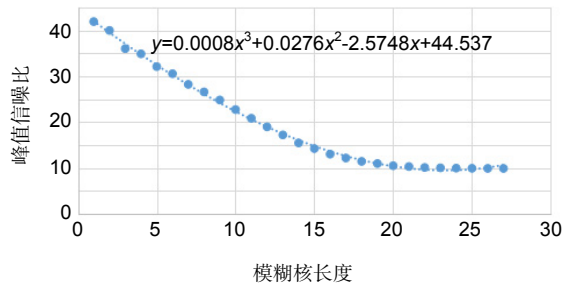


图 7 复原图像的 PSNR 值与模糊核长度的关系 ($\theta = 10^\circ$).

Fig. 7 The relationship between PSNR value and fuzzy kernel length of reconstructed image ($\theta = 10^\circ$).

4 实验验证

为验证上述仿真效果的有效性, 在实验室搭建实验平台, 其中数字投影仪型号为奥图码 HD21, CCD 型号为 MV-VS078M/FC。投影仪将标准正弦光栅条纹投影到钢轨表面, 静态拍摄的变形条纹图像如图 8(a) 所示。

然后将投影标准正弦光栅条纹图像的投影仪以一定的速度水平运动, 得到运动模糊的光栅条纹图像, 如图 8(b) 所示。

使用 Richardson-Lucy 算法对钢轨上运动模糊的光栅条纹图像进行复原, 所得复原图像如图 8(c) 所示, 其峰值信噪比为 27.0982。用维纳滤波法、点扩散函数算法和盲解卷积算法所得复原图像的峰值信噪比分别为 15.9907、19.6993、22.2294, 再次证明了 Richardson-Lucy 算法的最佳效果。

最后使用 PMP 对钢轨三维形貌进行重建, 模糊核

长度为 8 的变形模糊条纹图像和使用 Richardson-Lucy 算法的复原条纹图像所构建的钢轨三维外形分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示, 坐标表示量为长度, 横纵坐标单位为毫米(mm), 竖坐标单位为厘米(cm)。

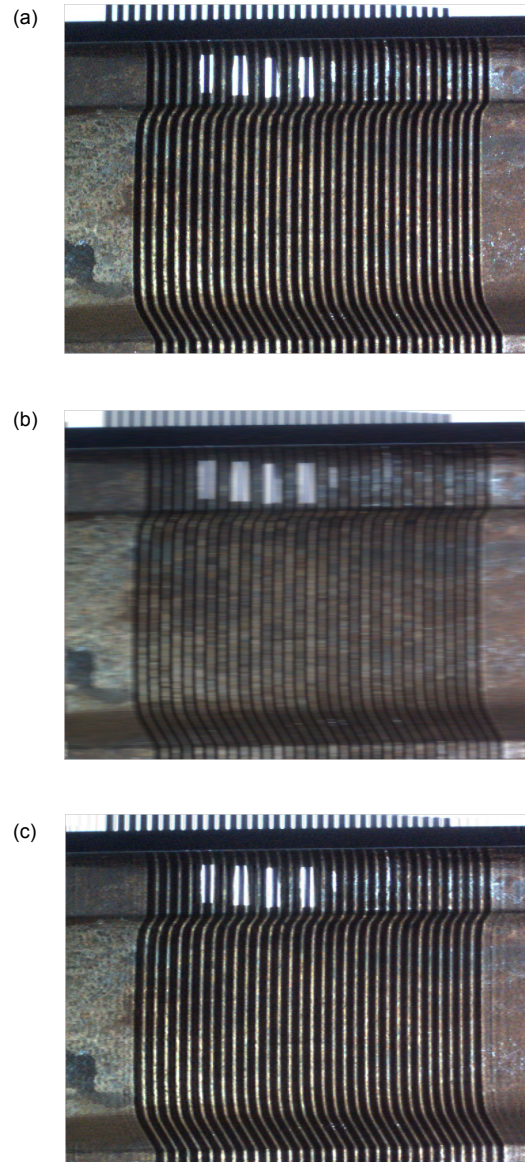


图 8 实验得到的光栅条纹图像。(a) 静止拍摄条纹图。(b) 运动模糊的条纹图。(c) Richardson-Lucy 算法的复原图。

Fig. 8 Grating fringes images obtained by experiments. (a) A static shot of a fringes image. (b) Motion blurred fringes image. (c) Restored image of the Richardson-Lucy algorithm.

可见, 在对钢轨的三维形貌进行在线测量时, 由于运动使得采集到的变形条纹图像伴随有运动模糊, Richardson-Lucy 算法可以较好地对运动模糊条纹图像

进行复原。采用在线 PMP 方法对运动模糊图像进行三维重构,得到的钢轨三维形貌质量较差,而对经过复原处理的变形条纹图像进行三维重构可以得到良好的钢轨三维形貌。在实际测量中,将所获得的运动模糊条纹图像经过 Richardson-Lucy 算法处理,并用在线 PMP 重建钢轨的三维形貌,将其与标准钢轨的三维形貌相对比,即可获取钢轨的磨损量,若钢轨表面有缺陷,通过复原的钢轨三维外形形貌即可判断缺陷的精确位置及尺寸。

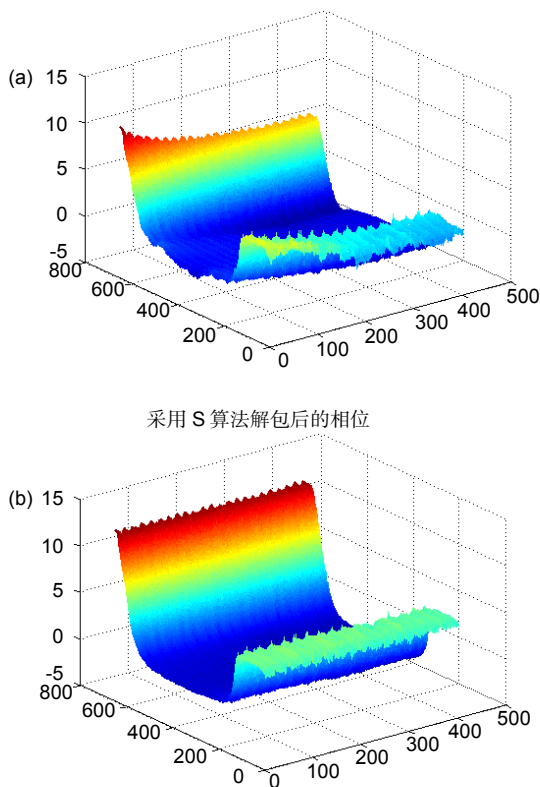


图9 钢轨外形三维重建。(a) 模糊条纹图像。(b) 复原条纹图像。

Fig. 9 3D reconstruction of the steel rail profile. (a) Fuzzy fringe image. (b) Restored fringe image.

5 结论

本文通过采取四种方法对运动模糊的变形条纹图像进行复原,并用峰值信噪比评价复原效果,结果表明 Richardson-Lucy 算法的复原效果最好,并且得出图像复原程度与车辆的运行速度的多项式关系。对于高速运动的车辆,使用 Richardson-Lucy 算法和相位测量轮廓术能够实现钢轨外形轮廓及表面缺陷的精确三维在线测量,为保障铁路安全能够发挥重要的作用,具有

很好的应用前景。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61471304)。

参考文献

- Zheng Shubin, Chai Xiaodong, An Xiaoxue, et al. Rail wear measuring method based on dynamic template[J]. *China Railway Science*, 2013, **34**(2): 7-12.
郑树彬, 柴晓冬, 安小雪, 等. 基于动态模板的钢轨磨损测量方法研究[J]. *中国铁道科学*, 2013, **34**(2): 7-12.
- Wang Bin. An invariant region-shape descriptor based on fourier transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, **40**(1): 84-88.
王斌. 一种不变的基于傅立叶变换的区域形状描述子[J]. *电子学报*, 2012, **40**(1): 84-88.
- Liu Kai, Wang Yongchang, Lau D L, et al. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, **27**(3): 553.
- Huang Hao, Da Feipeng. Novel phase unwrapping method for wavelet profilometry[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(2): 397-404.
黄昊, 达飞鹏. 小波变换轮廓术中快速相位展开方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, **33**(2): 397-404.
- Shen Huan, Li Shunming, Mao Jianguo, et al. Digital image restoration techniques: A review[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, **14**(9): 1764-1775.
沈岷, 李舜铭, 毛建国, 等. 数字图像复原技术综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, **14**(9): 1764-1775.
- Song Nuan, de Lamare R C, Haardt M, et al. Adaptive widely linear reduced-rank interference suppression based on the multistage wiener filter[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, **60**(8): 4003-4016.
- Tai Y W, Tan Ping, Brown M S. Richardson-Lucy deblurring for scenes under a projective motion path[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(8): 1603-1618.
- Chan R H, Yuan Xiaoming, Zhang Wenxing. A phase model for point spread function estimation in ground-based astronomy[J]. *Science China Mathematics*, 2013, **56**(12): 2701-2710.
- Li Weihong, Li Quanli, Gong Weiguo, et al. Total variation blind deconvolution employing split Bregman iteration[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, **23**(3): 409-417.
- Zhang Yi, Ren Hong, Xie Xiaoming, et al. Design and implementation of a flight state target 3D detection system[J]. *Nondestructive Testing*, 2015, **37**(7): 15-18, 28.
张毅, 任宏, 谢晓明, 等. 飞行目标的三维检测系统设计与实现[J]. *无损检测*, 2015, **37**(7): 15-18, 28.
- Jin Fei, Zhang Bin, Si Xuan, et al. Image restoration based on wiener filtering[J]. *Journal of Communication University of China (Science and Technology)*, 2011, **18**(4): 19-23.
金飞, 张彬, 司璇, 等. 基于维纳滤波的图像复原[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2011, **18**(4): 19-23.
- Zhang Yanmin. Restoration of motion blurred image based on lucy-richardson algorithm[J]. *Programmable Controller & Factory Automation*, 2014(4): 110-112.
张衍敏. 基于 Lucy-Richardson 算法的运动模糊图像复原[J]. *可编程控制器与工厂自动化*, 2014(4): 110-112.