

文章编号 1004-924X(2018)02-0363-08

## 散斑运动模糊复原的直线电机定子位置检测

赵吉文, 窦少昆, 赵 静\*, 宋俊材, 王 辉  
(安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 图像测量技术具有非接触性、抗干扰性等优点被越来越多地应用到双次级永磁直线电机定子位置检测中。针对图像采集过程中所产生的图像模糊问题, 提出了一种精确辨识运动模糊参数的方法, 实现了直线电机定子位置的精确测量。采用数字散斑图像作为原始拍摄面, 通过相机获得包含定子位置信息的序列运动模糊图像。利用奇异值分解对运动模糊图像进行去噪重构预处理, 降低噪声对运动模糊参数辨识精度的影响。求取预处理后图像的倒谱图, 通过主成分分析找到倒谱图二值化后亮线的主矢量方向即为模糊方向; 同时作出倒谱三维图, 利用其负峰值中两个最小值坐标求出模糊长度。根据计算的模糊参数值复原模糊散斑图像, 再利用图像亚像素测量方法获得定子位置。实验结果表明: 本文算法的计算耗时比 Radon 算法缩短了 5 倍多, 不同位移下的平均绝对误差仅为 0.084 7 mm, 满足直线电机定子位置检测的实时性和高精度要求。

**关键词:** 直线电机; 位置检测; 参数辨识; 奇异值分解; 主成分分析

**中图分类号:** TM301; TH82 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0363

## Position measurement of linear electric motor rotor based on restoration of motion blur speckle

ZHAO Ji-wen, DOU Shao-kun, ZHAO Jing\*, SONG Jun-cai, WANG Hui

(School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhaojing\_ustc@163.com

**Abstract:** Image measuring technique is more and more applied to the double secondary permanent magnet linear motor rotor position detection because of the advantages of non-contact and anti-interference. Aiming to the motion blur problem of image acquisition process, an accuration identification method of motion blur parameters was proposed to realize the precise measurement of linear electric motor rotor position. By using digital speckle image as the original photo surface, the motor rotor position information of sequence motion blurred image was obtained by camera. The singular value decomposition(SVD) was used to denoise the motion blur image for reducing the effect of noise on identification accuracy. The cepstrum image was calculated, and main direction of the cepstrum binary bright line, which was the blur direction, was found by using principal component analysis(PCA). At the same time, the cepstrum 3D image was made by using the two minimum values of its negative peak to calculate blur length. According to the parameters calculated, the blur speckle image was recov-

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No. 51577001, No. 51637001); 安徽省教育厅重点项目资助 (No. KJ2016A786)

ered, and rotor position was obtained by using sub-pixel image measurement method. Experimental results show that: the time consumption of proposed method is five times shorter than the Radon method. And the average absolute error under different displacements is only 0.084 7 mm, which satisfy the requirements of real time and high precision in linear electric motor rotor position measurement.

**Key words:** linear electric motor; position measurement; parameter identification; Singular Value Decomposition(SVD); Principal Component Analysis(PCA)

## 1 引言

直线电机由于良好的加速性能、准确的定位精度、行程不受束缚等特点,得到了广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。直线电机系统的控制精度决定了制造精度,而位置测量精度又直接影响了直线电机系统的控制精度。

传统的直线电机的动子位置测量多采用磁栅式传感器和光栅式传感器,其测量精度可以达到微米级,甚至纳米级。然而,磁栅式传感器容易受到外加磁场干扰,易退磁,影响使用寿命<sup>[2]</sup>;光栅式传感器的抗冲击力和防震能力较小<sup>[3]</sup>。近年来,图像位置检测法由于其非接触性、高精度和受环境影响小等优点,在直线电机动子位置测量中具有优越的特性和广泛的应用前景<sup>[4]</sup>。其原理是利用相机拍摄直线电机动子运动时的序列图像,通过数字相关算法计算相邻两幅图像之间的位移信息<sup>[5]</sup>。然而在拍摄获取图像时,由于相机和拍摄面之间存在相对运动等问题,所获得的图像产生运动模糊,降低了图像的分辨率和质量,掩盖了图像的很多信息,给后面的动子位置检测带来很大的误差。若想实现直线电机动子位置的高精度测量,准确获取模糊参数并对模糊图像进行有效的复原就显得尤为重要。

对模糊图像进行复原处理主要就是找到降质图像的模糊参数,即模糊长度和模糊方向,利用这两个参数建立点扩展函数(Point Spread Function, PSF)模型,进而采用逆过程来复原模糊图像。传统的 PSF 模型建立方法相对比较简单,复原图像中存在严重的振铃噪声,效果并不理想<sup>[6]</sup>。且已有的一些方法在直线运动模糊图像的参数辨识上仍存在问题,比如在求取模糊长度时, Radon 变换算法的估计误差较大,精度较低;在求取模糊方向时,需要进行 1°到 180°的 Radon 变换,随着计算精确度要求的增加,所需要的计算时间会大

大地增加<sup>[7]</sup>。此外,采集到的运动模糊图像中存在大量的系统噪声以及环境噪声,运动模糊参数的识别结果会产生较大的误差<sup>[8]</sup>。

针对上述问题,本文提出了一种直线运动模糊参数快速准确的辨识方法,搭建了基于数字散斑图像的直线电机动子位置测量系统。首先利用奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)对采集到的模糊散斑图像进行去噪重构处理,再利用主成分分析法和倒谱三维图的负峰值的两个最小值点坐标对模糊参数进行准确计算,利用求取的模糊参数实现对模糊散斑图像的复原,将复原图像用于计算直线电机的动子位移,从而提高位移测量精度。

## 2 数字散斑图像的生成

本文采用文献[9]提出的算法来模拟生成数字散斑图像,该算法可以通过相关的参数精确控制散斑图像的尺寸、散斑颗粒的大小、数目及密度分布,其图像灰度分布函数可表示为:

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^n S_0 \exp \left[ -\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{k^2} \right], \quad (1)$$

其中: $n$ 为散斑数量, $k$ 为散斑颗粒大小, $S_0$ 表示图像背景光强,通常 $S_0$ 为 1, $(x_i, y_i)$ 为散斑颗粒的位置坐标。模拟生成的散斑图像如图 1 所示。



图 1 模拟生成的散斑图像

Fig. 1 Speckle image generated from simulation

沿平行于直线电机定子的运动方向,在直线电机底座上固定目标散斑图像,在定子侧面安装一个微型微距相机,在定子带动相机的运动过程中,利用相机对散斑图像进行连续拍摄采集,结合测量系统中的图像处理单元实现对直线电机定子位置的实时测量,测量装置示意图如图 2 所示。

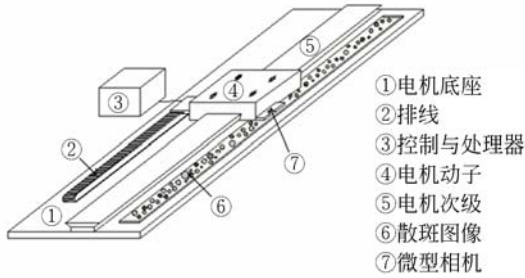


图 2 定子位置测量装置示意图

Fig. 2 Setup sketch of mover position measurement

### 3 直线运动模糊参数的辨识

直线运动模糊图像  $g(x, y)$  可视为退化函数  $P(x, y)$  和噪声函数  $n(x, y)$  综合表达的一个数学模型,那么有:

$$g(x, y) = P(x, y) \otimes S(x, y) + n(x, y), \quad (2)$$

其中:  $S(x, y)$  为原始图像,  $\otimes$  为空间卷积运算。

由式(2)可知,要想复原模糊图像  $g(x, y)$ ,就要知晓点扩展函数  $P(x, y)$ 。对于直线运动的模糊情况,点扩展函数  $P(x, y)$  可以表示为:

$$P(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{L}, & \sqrt{x^2 + y^2} \leq L \text{ 且 } y/x = \tan \theta \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)表明,点扩展函数  $P(x, y)$  受模糊长度  $L$  和模糊方向  $\theta$  两个参数的影响,因此准确计算  $L$  和  $\theta$  是复原高质量图像的关键。

#### 3.1 运动模糊图像的预处理

由于系统噪声和环境噪声广泛存在于采集到的模糊图像中,它们会对模糊参数的识别精度产生较大的影响,所以本文先利用 SVD 对模糊散斑图像进行去噪处理<sup>[10]</sup>,减小噪声对模糊参数辨识的影响。

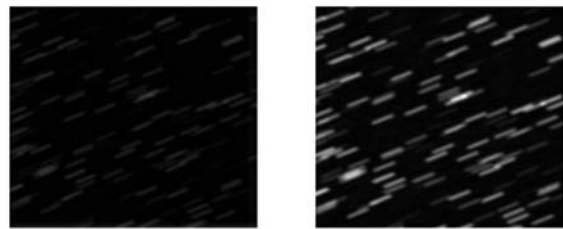
若  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{l_1 \times l_2}$  ( $l_1 \geq l_2$ ) 为受噪声污染的图像矩阵,  $\mathbf{M}$  的秩  $\text{rank}(\mathbf{M}) = r$  ( $r \leq l_2$ ), 则  $\mathbf{M}$  的奇异值分解定义为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{B}^T, \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  为酉矩阵,分别代表矩阵  $\mathbf{M}$  的左奇异矩阵和右奇异矩阵;  $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{l_1 \times l_2}$  为奇异值阵,其对角线元素为  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$ ,  $\mathbf{R}$  为矩阵  $\mathbf{M}$  的秩,  $\lambda_i$  为矩阵  $\mathbf{M}$  的第  $i$  个奇异值。根据上面定义,把  $\mathbf{M}$  矩阵中的零奇异值除去,则式(4)中的  $\mathbf{M}$  又精简表示为:

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^R \lambda_i \mathbf{A}_i \mathbf{B}_i^T. \quad (5)$$

矩阵中的奇异值反映了矩阵的能量分布情况,一般噪声的能量都比较小,所以对应的奇异值也比较小。这样,设置一个阈值,通过去除矩阵中的小奇异值来滤掉噪声子空间,并利用剩余的奇异值(即有效信号子空间)重构图像矩阵,从而达到去除噪声的目的。其中,设置阈值的依据是重构后图像质量的高低,用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来衡量去噪效果<sup>[11]</sup>。图 3 为去噪重构前后运动模糊散斑图像的对比图,其中设置的阈值  $\lambda_i / \sum_{i=1}^R \lambda_i \geq 90\%$ , 重构后图像辨识度更高,边缘更加明显,更有利于模糊参数辨识。



(a) SVD 去噪前的模糊散斑 (b) SVD 去噪后的模糊散斑

(a) Blur speckle before SVD (b) Blur speckle after SVD

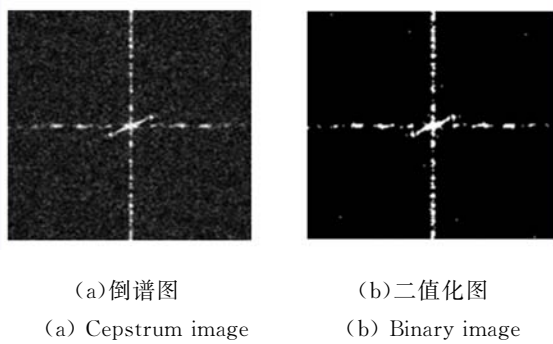
图 3 SVD 处理前后的模糊散斑图像

Fig. 3 Experiment of SVD denoising

#### 3.2 运动模糊参数辨识

对于运动模糊图像,取频谱对数并进行傅里叶变换,这样就可以把模糊信息和原始信息分离开来,得到其倒谱图。将倒谱图压缩居中,通过阈值处理,边缘检测“canny”算子二值化倒谱图,如图 4 所示。利用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)法找到倒谱图二值化后的亮线主矢量方向,就是模糊方向<sup>[12]</sup>;同时构建模糊图像的倒谱三维图,找到三维坐标图中负峰的两个最小值的坐标,这两个坐标点间距的一半就是所求的模糊长度。

PCA 是多元统计分析法中用来分析数据的



(a) 倒谱图 (b) 二值化图

(a) Cepstrum image (b) Binary image

图 4 模糊散斑的倒谱图和二值化图

Fig. 4 Cepstrum and binary images of blur speckle

一种方法,它广泛应用于高维数据特征提取和降低特征空间维数<sup>[13]</sup>。利用 PCA 算法找到倒谱图二值化后亮线的主矢量成分,使得各个分量在此矢量成分方向上的投影最大,此矢量方向即为亮线方向,也就是所求的模糊方向。

假设  $\mathbf{X}$  为模糊散斑图像倒谱的二值化图,则有:

$$\mathbf{X} = \{x_n = (i_n, j_n), n=1, 2, 3, \dots\}, \quad (6)$$

其中  $x_n$  为亮线的第  $n$  个坐标点。PCA 算法主要是为了得出一个方向坐标点  $\omega$ ,使得  $\mathbf{X}$  在该点方向投影之后的方差最大。

将一个空间点投影到一个向量中去,首先计算出原空间的中心点坐标,其求解公式为:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n. \quad (7)$$

假设  $\mathbf{u}$  为投影向量,则投影之后方差  $S$  的求解公式为:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\mathbf{u}^T x_n - \mathbf{u}^T \bar{x})^2 = \mathbf{u}^T \mathbf{S} \mathbf{u}. \quad (8)$$

利用拉格朗日乘子法优化等式(8)的右边,并对其求导,使之为 0,变换后得到:

$$\mathbf{S} \mathbf{u} = \lambda_k \mathbf{u}. \quad (9)$$

式(9)是一个标准的特征值表达式,  $\lambda_k$  对应特征值,  $\mathbf{u}$  对应特征向量。式(9)左边取得最大值的条件就是  $\lambda_k$  最大。如果  $\lambda_k$  对应的坐标为  $\lambda_k = (i_k, j_k)$ ,则有  $\omega = \lambda_k$ ,则所求的倒谱图亮线的方向角度为  $\theta = \arctan(j_k/i_k)$ ,那么  $\theta$  就是所求的模糊方向。

经频谱搬移后的倒谱三维图,在其运动模糊方向分为上、下两个部分,分别代表原始图像特征和模糊参数特征,如图 5 所示。

假设负峰值区域两个最小值的坐标分别为

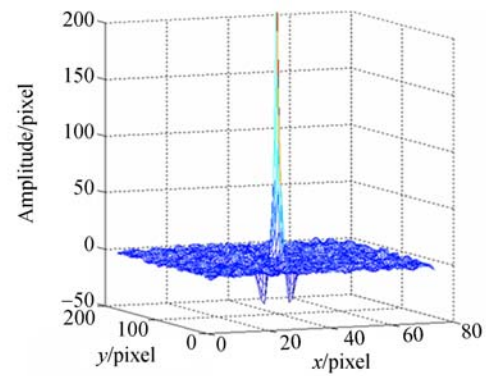


图 5 倒谱三维图

Fig. 5 3D image of cepstrum

$F_{\min}(p_1, q_1)$  和  $F_{\min}(p_2, q_2)$ 。由图 5 可以看出,倒谱三维图具有左右对称的特性,在搜索确认负峰中两个最小值的坐标时,为了简化计算量先令倒谱图的左半对称面为 0,检测整个倒谱图就容易得到右半对称面的最小值点坐标  $F_{\min}(p_1, q_1)$ ;同理可得,令倒谱图的右半对称面为 0,就能得到左半对称面的最小值点坐标  $F_{\min}(p_2, q_2)$ 。根据这两个最小值的坐标点,此时模糊长度  $L$  为:

$$L = \frac{\sqrt{(p_1 - p_2)^2 + (q_1 - q_2)^2}}{2}. \quad (10)$$

为了验证本文算法计算模糊参数值的准确性,随机生成几组不同运动模糊长度和模糊方向的运动模糊散斑图像,利用本文算法进行仿真实验计算这些模糊散斑图像的两个模糊参数值,并分析对比与实际模糊参数值的误差,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,本文算法辨识模糊长度和模糊方向的最小误差分别为 0.014 7 pixel 和  $0^\circ$ ,8 组仿真数据的平均辨识误差为 0.081 3 pixel 和  $0.537 5^\circ$ ,辨识的模糊参数精度较高。

表 1 运动模糊参数分析结果

Tab. 1 Analysis results of motion blur parameters

实际参数	长度/角度 [pixel, $^\circ$ ]	
	辨识参数	绝对误差
[12.3, 15]	[12.1284, 15]	[0.1716, 0]
[15.4, 72.7]	[15.4244, 73.7]	[0.0244, 1]
[17, 82.6]	[17.0491, 82.8]	[0.0491, 0.2]
[18, 19.9]	[18.1296, 20.3]	[0.1296, 0.4]
[24.3, 62.1]	[24.2797, 62.7]	[0.0203, 0.6]
[25.2, 32]	[25.1853, 32]	[0.0147, 0]
[27, 86.1]	[26.9342, 84.3]	[0.0658, 1.8]
[30.7, 46]	[30.8750, 46.3]	[0.1750, 0.3]

### 4 实验和数据分析

#### 4.1 图像测量系统

在图 2 定子位置测量原理装置的基础上,根据物体运动的相对原理,把所构造的散斑图像固定在定子上,而在直线电机底座的侧面固定一个相机,当定子带动目标散斑图像运动时,相机可以对散斑图像进行连续拍摄采集,所搭建的测试平台如图 6 所示。

实验所选用电机的最大运行速度为 1 m/s,有效行程为 380 mm,相机分辨率为 1 024 pixel×1 024 pixel。在进行基于图像方法的定子位置测量之前,要对测量系统进行标定,即确定电机定子的实际位移与相机采集到的散斑图像像素位移的映射关系。根据文献[14]的思想进行系统标定,得到的标定结果为:畸变率  $f = -0.003 2$ ,水平比例因子  $\eta_x = 1.002 6$ ,光学放大倍数为 1。因为系统的畸变率非常小,且在实际测量过程中水平比例因子取值为 1,这样就能有效地消除镜头畸变所造成的测量误差。最后得出系统的标定系数  $\xi = 1.959 7$ 。

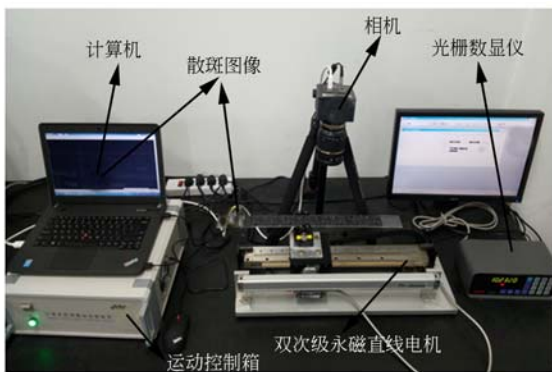


图 6 直线电机定子位置检测平台

Fig. 6 Linear motor rotor position detection system

#### 4.2 实验结果与分析

运动模糊图像的复原算法有很多种,但是每种算法都有其优劣性,为了验证复原实验结果的准确性,在本文所提出的模糊参数辨识算法计算出两个模糊参数的基础上,分别利用空间域法、正则化算法和频域法中的模糊图像复原算法进行图像复原,对比 4 种算法的复原效果,结果如图 7 所示。其中,最小二乘滤波复原属于空间域法, Richardson-Lucy 滤波复原属于正则化算法,逆滤

波和维纳滤波复原属于频域法。从图 7 中可以看出, Richardson-Lucy 滤波复原、逆滤波复原和维纳滤波复原这 3 种方法的复原效果都明显比最小二乘滤波复原效果好,复原后图像的散斑颗粒边缘轮廓更加清晰,但是维纳滤波复原后的图像质量更加理想,其他二者复原后的图像中存在较明显的振铃现象,散斑颗粒有明显的重叠。本文采用维纳滤波算法来复原运动模糊图像,以进一步验证本文所提出的模糊参数辨识算法和传统的 Radon 算法的优劣性。

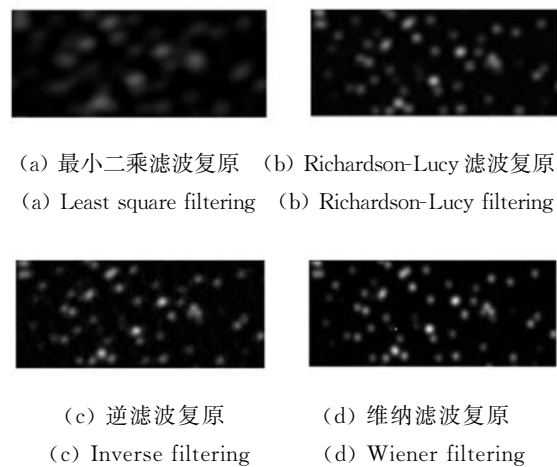


图 7 不同复原算法的复原图

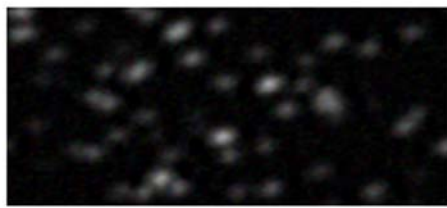
Fig. 7 Recovered images of different recovery methods

直线电机高速运动过程的纵向振动以及环境因素虽然会使相机采集散斑图像的过程中产生运动模糊,但是由于直线电机自身的稳定结构使得所产生的模糊散斑图像的模糊参数较小,模糊图像失真不是太明显。这样就对模糊参数辨识算法的辨识精度要求更高,本文算法的优越性较传统算法更为突出,图 8 为传统 Radon 算法和本文算法辨识模糊参数后用维纳滤波算法复原图像的实验对比图。

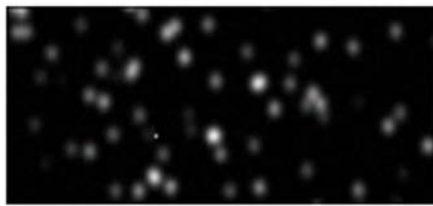


(a) 模糊散斑图

(a) Blur speckle image



(b) Radon 算法复原图  
(b) Recovery image of Radon method



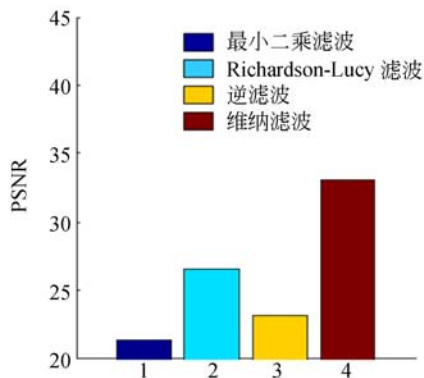
(c) 本文提出的算法复原图  
(c) Recovery image of proposed method

图 8 复原实验对比图

Fig. 8 Contrast of recovery images

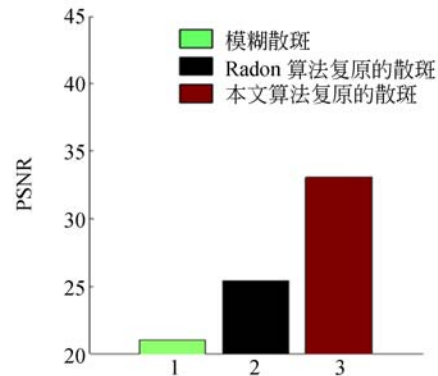
由图 8 可以看出,本文提出算法的复原图像比 Radon 算法的复原图像的质量高,散斑颗粒的轮廓识别度更清晰。为了更加定量地分析本算法复原模糊散斑图像的效果,进一步利用峰值信噪比来客观评价图像质量,峰值信噪比越高,图像质量就越好<sup>[15]</sup>。分别计算了上面 4 种不同复原算法下复原图像的 PSNR 值,以及模糊散斑图像、Radon 算法和本文所提出的算法在维纳滤波复原算法下的复原图像的 PSNR 值,如图 9 所示。

图 9(a)为四种不同复原算法下复原图像的 PSNR 值柱状对比图,从图中可以看出维纳滤波



(a) 4 种复原算法下复原图像的 PSNR 值

(a) PSNR of recovery images of four recovery methods



(b) Radon 和本文算法经维纳滤波复原后的 PSNR 值  
(b) PSNR of recovery images of Radon and proposed methods after Wiener filtering

图 9 PSNR 对比图

Fig. 9 Contrast of PSNR

复原后散斑图像的 PSNR 值明显高于其他 3 种复原算法下复原散斑图像的 PSNR 值,复原后的图像质量更高。图 9(b)为 Radon 法和本文所提出的算法在辨识出模糊参数后经维纳滤波复原的散斑图像 PSNR 值并和未处理过的模糊散斑图像的 PSNR 值进行对比,从图中可以看出,复原后散斑图像的 PSNR 值明显高于模糊散斑图像的 PSNR 值,且本文算法辨识的模糊参数经维纳滤波复原后的图像 PSNR 值也明显高于 Radon 算法复原后的散斑图像,复原图像的质量更加接近原始图像。

为了验证在本文算法下复原的散斑图像用于直线电机定子位置检测时的稳定性、准确性和可行性,对比传统 Radon 算法和本文所提出算法在不同定子位移下所用的计算耗时,得到图 10 的曲线。同时利用亚像素测量算法计算对比模糊散斑、传统 Radon 算法和本文提出算法复原后的图像用于直线电机定子位置检测的计算位移与实际位移的绝对误差,得到图 11 所示的曲线图。

图 10 表明,随着定子位移量的增加,两种算法的计算耗时基本没有波动,但是本文算法的平均耗时为 5.176 5 s,相比 Radon 算法的平均耗时 27.862 2 s,足足快了 5 倍多。图 11 为绝对误差曲线。图 11 表明,模糊散斑图像位移计算的绝对误差大于 0.482 2 mm, Radon 算法复原图像位移计算的绝对误差小于 0.348 6 mm,而本文算法复原图像位移计算的绝对误差小于 0.150 3 mm。综上所述,本文算法的复原图像用于直线电机

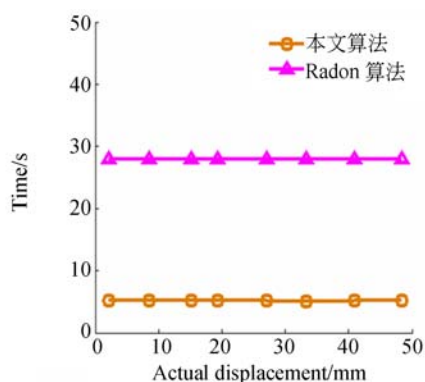


图10 不同算法的耗时曲线图

Fig. 10 Time-consuming curves of different methods

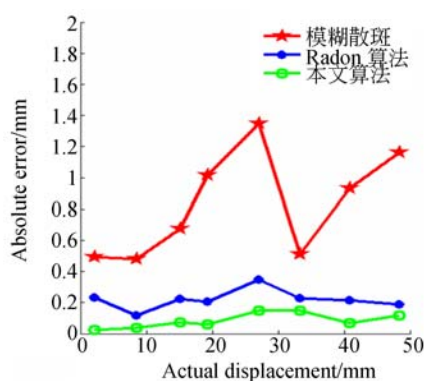


图11 实际测量的绝对误差

Fig. 11 Absolute error of actual measurement

## 参考文献:

- [1] 叶云岳. 直线电机在现代机床业中的应用与发展[J]. 电机技术, 2010(3): 1-5.  
YE Y Y. Application & development of the linear motor in the modern machine tool industry[J]. *Electrical Machinery Technology*, 2010(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] HAO SH H, LIU J ZH, HAO M H, et al.. Design of high precision magnetic grid displacement sensor[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE, 2008: 185-188.
- [3] 路士增, 林兰波, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的复合材料损伤识别系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2894-2901.  
LU SH Z, LIN L B, JIANG M SH, et al.. Identifi-

cation system of composite material damage based on FBG sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2894-2901. (in Chinese)

## 5 结 论

本文分析了传统直线电机定子位置测量传感器的不足, 针对定子实际运动时的图像采集过程中会产生运动模糊的情况, 分析了传统模糊图像参数辨识存在的局限性, 提出先对模糊散斑图像进行去噪重构预处理, 然后利用 PCA 求取模糊方向参数, 同时利用倒谱三维图中负峰值两个最小值坐标来求取模糊长度参数。对比传统的 Radon 算法辨识模糊参数方法, 通过实验验证了本文算法用于直线电机定子位置测量的可行性和准确性。实验结果表明: 相比于传统的 Radon 算法辨识模糊参数, 本文的算法辨识模糊参数更加精准, 用维纳滤波复原后图像的 PSNR 更高、质量更好, 且计算耗时缩短了 5 倍多; 对比模糊散斑图像、传统 Radon 算法复原后的散斑图像和本文算法复原后的散斑图像用于不同位移下直线电机定子的位置测量时, 未复原的模糊散斑图像的平均绝对误差为 0.827 5 mm, 传统 Radon 算法复原后图像的平均绝对误差值为 0.219 8 mm, 而本文算法复原后图像的平均绝对误差值为 0.084 7 mm, 能够更好地满足直线电机定子的高精度检测要求。

- [4] ZARROUATI-VISSIERE N, ROUCHON P, BEAUCHARD K. Rotational and translational bias estimation based on depth and image measurements[C]. *Proceedings of the 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, 2012: 6627-6634.
- [5] 陈彦彤, 徐伟, 朴永杰, 等. 用于遥感图像目标快速匹配识别的改进混合溢出树算法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2310-2317.  
CHEN Y T, XU W, PIAO Y J, et al.. Improved hybrid spill-tree algorithm for fast target matching recognition of satellite images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2310-2317. (in Chinese)
- [6] 方明, 王成, 尹大力. 基于最优费米函数的点扩散函数求取与图像复原[J]. 光子学报, 2014, 43

- (S1): 0110001.  
 FANG M, WANG CH, YIN D L. Optimal Fermi function based PSF calculation and image restoration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43 (S1): 0110001. (in Chinese)
- [7] MOGHADDAM M E, JAMZAD M. Finding point spread function of motion blur using radon transform and modeling the motion length[C]. *Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, IEEE, 2004: 314-317.
- [8] 赵鹏, 曹军, 韦兴竹. 匀速直线运动模糊图像的模糊参数鲁棒识别[J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (9): 2430-2438.  
 ZHAO P, CAO J, WEI X ZH. Identification of robust blur parameter for uniform linear motion blurred images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (9): 2430-2438. (in Chinese)
- [9] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [10] 王益艳. 基于特征均值的 SVD 信号去噪算法[J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(5): 121-123, 142.  
 WANG Y Y. Mean value of eigenvalue-based SVD signal denoising algorithm[J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(5): 121-123, 142. (in Chinese)
- [11] 王敏, 周磊, 周树道, 等. 基于峰值信噪比和小波方向特性的图像奇异值去噪技术[J]. *应用光学*, 2013, 34(1): 85-89.  
 WANG M, ZHOU L, ZHOU SH D, *et al.*. Image SVD denoising based on PSNR and wavelet directional feature[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 85-89. (in Chinese)
- [12] 魏鑫, 陈广锋. 基于倒频谱的无噪声运动模糊图像快速复原算法[J]. *东华大学学报:自然科学版*, 2016, 42(2): 228-233.  
 WEI X, CHEN G F. Fast restoration algorithm of noise-free images based on cepstrum[J]. *Journal of Donghua University: Natural Science*, 2016, 42(2): 228-233. (in Chinese)
- [13] 黄伟国, 顾超, 朱忠奎. 用于目标识别的 PCA-SC 形状匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 2103-2110.  
 HUANG W G, GU CH, ZHU ZH K. PCA-SC shape matching for object recognition[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (8): 2103-2110. (in Chinese)
- [14] 王兵振, 刘文耀. 一种显微图像测量系统的标定方法[J]. *光电工程*, 2006, 33(2): 119-122.  
 WANG B ZH, LIU W Y. Camera calibration method for micro-image measuring system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(2): 119-122. (in Chinese)
- [15] 窦少昆, 赵静, 赵吉文, 等. 直线电机定子位置测量的非周期栅栏图像优选[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 343-350.  
 DOU SH K, ZHAO J, ZHAO J W, *et al.*. Optimization of the aperiodic fence image for the linear electric motor rotor position measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38 (2): 343-350. (in Chinese)

## 作者简介:



赵吉文(1973—),男,安徽砀山人,博士生导师,2005年于中国科学技术大学获得博士学位,2007年于中国科学技术大学博士后出站,主要研究方向为高精度直线伺服系统、机器人等。E-mail: ustczjw@ahu.edu.cn

## 通讯作者:



赵静(1985—),女,安徽淮北人,博士,讲师,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,主要研究方向为直线电机位置检测、光测力学等。E-mail: zhaojing\_ustc@163.com