

直线电机定子位置测量的非周期栅栏图像优选^{*}

窦少昆,赵 静,赵吉文,宋俊材,王 辉

(安徽大学电气工程与自动化学院 合肥 230601)

摘 要:图像位置测量方法在双次级永磁直线电机定子位置测量中应用时,目标源图像的选取对其测量的精度和抗干扰性至关重要。采用栅栏图像作为原始拍摄面,根据其宽度标准差和灰度梯度和来构造不同的非周期栅栏图像用于实验。利用四叉树分解方法把采集到的非周期栅栏图像分割成各个块图像,根据块图像的边缘纹理与其邻域像素存在的约束条件来区分并消除边缘纹理对噪声测量的干扰,准确得出块图像中的噪声污染程度;再对各块图像进行加权平均后得到整幅图像的噪声水平。最后,利用峰值信噪比来评价图像的质量,并通过相位相关算法来验证其抗干扰性,从而筛选出强鲁棒性的非周期栅栏图像。结果表明,在栅栏图像宽度标准差为 $[8.1, 8.3]$ 、灰度梯度和为 $[18\ 000, 22\ 000]$ 之间取值构造的灰度非周期栅栏图像的峰值信噪比值较优、相似性峰值高、图像的抗干扰性强,能够实现直线电机定子位置的高精度测量。

关键词:图像测量;非周期栅栏图像;四叉树分解;边缘纹理;峰值信噪比

中图分类号: TM301 TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Optimization of the aperiodic fence image for the linear electric motor rotor position measurement

Dou Shaokun, Zhao Jing, Zhao Jiwen, Song Juncai, Wang Hui

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

Abstract: When the technology of the image measurement is applied in the double secondary permanent magnet linear motor rotor position measurement, the selection of the target source image is very important for its measurement precision and anti-interference. According to the width of the standard deviation and the gray gradient sum to construct different aperiodic fence image, the original picture surface is used. The quadtree decomposition method is used to decompose the collected fence image into each piece. According to the edge texture of the block image and its constraint conditions of neighborhood pixels to distinguish as well as eliminate the influence of edge texture of noise, the noise levels of block image are achieved accurately. Each image block is weighted, the whole image with noise results from the average level. Finally, peak signal to noise ratio is used to evaluate the quality of the image, and the phase correlation algorithm is used to verify its anti-interference. Results show that the gray aperiodic fence image's peak signal to noise ratio is better and its similarity peak is higher for the width standard deviation change in $[8.1, 8.3]$ and the gray gradient sum change in $[18\ 000, 22\ 000]$, and its anti-interference is better and can realize high precision measurement of the linear electric motor rotor position.

Keywords: image measurement; aperiodic fence image; quadtree decomposition; edge texture; peak signal to noise ratio (PSNR)

1 引言

直线电机由于其加速性能好、定位精度准确、行程不受束缚等特点,得到了日益广泛的研究和应用^[1-2]。直线电机系统的控制精度决定了制造精度,而位置测量的精

度又直接影响了直线电机系统的控制精度。

传统的直线电机的定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。但是,磁栅式传感器容易受到外部磁场干扰、易退磁、影响使用寿命^[3];光栅式传感器抗冲击力和防震能力较小,且价格也比较昂贵^[4]。近年来,图像位置检测方法

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^[5]。图像位置检测方法中,目标源图像的选取对测量的精度和抗干扰性都是至关重要的^[6-7]。电机动子在高速运动过程中,摩擦引起的纵向振动及强光变化,会影响采集到的图像的质量,进而造成图像一定程度的失真。为了保证测量结果的稳定性,所选取的目标源图像必须具有较强的非周期性和鲁棒性。本文根据直线电机的运动特点,将目标图像简化成栅栏图像,采用栅栏图像作为直线电机动子位置测量研究的原始拍摄面,可以有效的抑制直线电机动子运动过程中产生的抖动对动子位置测量的影响。根据栅栏图像的宽度标准差和灰度梯度和来构造不同类型的栅栏图像,引入改进的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)作为标准来筛选非周期栅栏图像,优选出能够满足直线电机动子位置测量的高精度和抗干扰性要求的非周期栅栏图像。

在传统的峰值信噪比评价图像质量的研究中,同一幅图像中的高频、中频和低频 3 个部分对噪声的抗干扰能力不尽相同,且边缘纹理对噪声的测量干扰也较大,这样就使得峰值信噪比评价图像质量不够准确^[8]。针对以上缺陷,首先利用四叉树分解^[9]方法分解采集到的栅栏图像,使每个图像块的强度分布基本相同;再通过分析分解后的各个块图像的边缘纹理与其邻域像素存在的灰度梯度值约束条件,剔除边缘纹理对噪声测量的干扰;最后对各栅栏图像块加权平均后就得到了整幅图像中的噪声含量,之后利用峰值信噪比来评价此栅栏图像的质量,同时利用相位相关算法来验证拟得到的栅栏图像的抗干扰性并结合实验验证实际位移时的绝对误差值,从而筛选出具有强鲁棒性的非周期栅栏图像。

2 栅栏图像的生成和分类

2.1 栅栏图像的生成

由于直线电机的加速度大,且动子一般要实现高速往复式运动,因此动子沿运动方向会产生振动与冲击。如果用普通的灰度图像作为拍摄面,动子的纵向振动会降低采集到的图像的质量,干扰动子位置测量的准确性。考虑到理想的直线运动竖直位移为零的特点,将目标图像竖直方向的灰度变化量置 0,仅分析横向信息对抗干扰性能的影响;而与电机动子运动方向一致的水平方向的图像灰度色阶变化越明显,差异性越大,图像的抗干扰性就越强,因此对于水平方向上的图像灰度梯度和变化越剧烈越好。由此可以得知,令目标图像在水平方向上变化剧烈,竖直方向上灰度梯度和为 0,如式(1)、(2)所示。

$$W_x = \max(\sum_{x=1}^M \sum_{y=2}^N |G_x|) \tag{1}$$

$$W_y = \sum_{x=1}^M \sum_{y=2}^N |G_y| = 0 \tag{2}$$

式中: G_x 、 G_y 分别表示图像 $f(x,y)$ 的水平、竖直灰度梯度, M 、 N 分别为图像的长和宽。具有灰度变化的图像被简化为栅栏条纹图像。

2.2 栅栏图像的分类

根据式(1)、(2)可知,栅栏图像横向灰度可变、纵向灰度变化为 0,且栅栏图像的条纹宽度也是可变的,通过控制栅栏条纹的宽度和灰度的变化,就会出现等周期、近似周期和非周期 3 种不同类型的栅栏图像,如图 1 所示。

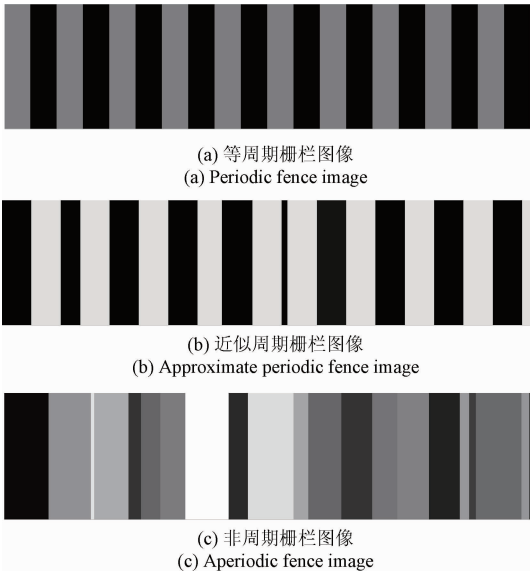


图 1 三种类型栅栏图像
Fig.1 Three kinds of fence image

文献[6]利用“栅栏图像条纹宽度序列的相关数组系数和标准差”对这 3 种类型的栅栏图像进行筛选,得出非周期的栅栏图像用于直线电机动子位置检测时的抗干扰性最强,测量结果的精度更好。本文在此研究基础上,引入基于改进的 PSNR 优选非周期栅栏图像的方法,把目标源图像的 PSNR 值引入到图像抗干扰评价中。利用非周期栅栏图像的宽度标准差和灰度梯度和这两个参数的变化构造出一系列的非周期栅栏图像用于实验,在动子运动过程中进行图像的采集,通过改进的峰值信噪比来对采集的非周期栅栏图像进行优选,得出非周期栅栏图像的构造标准以更好地满足抗干扰性和测量精度的要求。

根据直线电机定子位置测量思想,设计出定子位置测量装置示意图。沿平行于直线电机定子运动方向,在直线电机底座上,通过激光雕刻刻画出栅栏图像,在定子侧面安装一个微型微距摄像头,随着定子运动对栅栏条纹连续拍摄,实现对直线电机定子位置的实时测量,如图2所示。

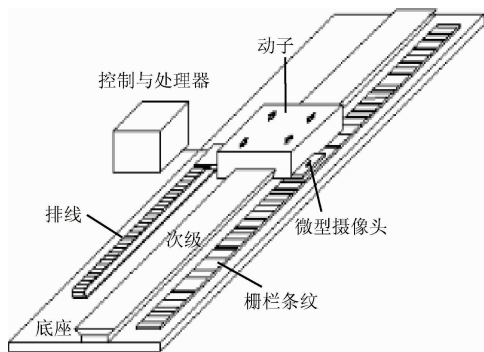


图2 定子位置测量装置

Fig. 2 Setup sketch of mover position measurement

3 改进的峰值信噪比算法

3.1 图像分块处理

对于一幅图像,由于它的不同位置之间强度变化不同,图像就会存在高频和低频的区域之分。利用均方差(mean squared error, MSE)来衡量图像中的高低频含量是一种有效的手段,当一幅图像中的低频成分含量较多时,图像的亮度变化较小且变化缓慢,其均方差值较小,反之当它的高频成分含量较多时,图像的亮度变化较大且变化剧烈,其均方差值较大。因此,依据图像的均方差值来对图像进行分块,是一种行之有效的手段。采用四叉树分解方法,将图像分成包含不同高低频成分的子块。对于栅栏图像 f_{ij} ,其均方差表达式为:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{0 \leq i \leq M} \sum_{0 \leq j \leq N} (f_{ij} - f)^2 \quad (3)$$

式中: M 、 N 为栅栏图像的长和宽, f 为栅栏图像的均值。

设置一个阈值 T_1 作为栅栏图像的分块标准,把图像分成高低频含量不同的子块。倘若分割后的图像块的均方差值超过阈值 T_1 ,表明所含高频成分较多,边缘信息和背景较复杂,利用四叉树继续分块。此过程一直进行下去,直到每个栅栏图像块 MSE 小于阈值 T_1 ,完成对图像的分块预处理。

由图3所示,在设置了阈值 T_1 后用四叉树对栅栏图像进行分割的结果。可以看出,当区域中所含的低频成分较多时,对应的分割后的子块尺寸较大;当区域中所含

的高频成分较多时,对应的分割后的子块尺寸较小。

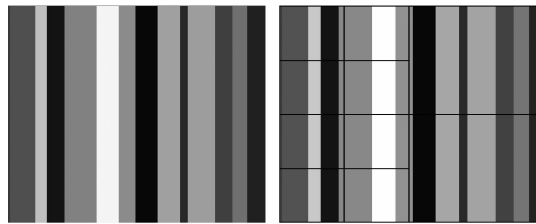


图3 栅栏图像及其分块情况

Fig. 3 The fence image and its plots

3.2 PSNR 算法

图像在生成、传输或者采集过程中因受到各种噪声的干扰和影响,存在不同程度的失真或者边缘模糊,因此区分噪声和边缘纹理对于数字图像的质量评估至关重要^[11]。一幅栅栏图像,除了一些孤立噪声点外,每个像素与其相邻的像素之间有着密切的关联性,其像素点的灰度色阶与其周围像素点的灰度色阶相似度很高,且梯度值正比于其周围相邻像素灰度色阶值之差^[12],即图像低频部分梯度值小,图像的高频部分梯度值大。虽然噪声和纹理边缘均具有较高的梯度值,属于高频分量,但是边缘纹理像素与其邻域像素存在一定的像素约束条件,具有明显的结构特征^[13-14],利用这种结构特征可以有效的把噪声从边缘中提取出来,从而更加准确地计算出图像中所包含的噪声量,提高图像质量的评价准确度。对于块图像中的边缘纹理像素点,其 0° 、 45° 、 90° 和 135° 这4个方向必然有一个较小的梯度值。根据这一个特性,就能实现将一般的噪声类型与边缘纹理有效地区分开来。

任意选取栅栏图像块中的一个边缘纹理像素点 $I(i, k)$,定义该像素点 0° 、 45° 、 90° 和 135° 这4个方向的方向梯度值,对于 0° 方向梯度 $G_{(0)}(i, k)$:

$$G_{(0)}(i, k) = \|I(i+1, k) - I(i, k)\| + \|I(i, k) - I(i-1, k)\| - \|I(i+1, k) - I(i-1, k)\| \quad (4)$$

由于栅栏图像纵向灰度变化为零,那么其在 90° 的方向梯度为0,可不予考虑。根据 0° 方向梯度的定义,同理可以定义 45° 和 135° 的方向梯度。对比 0° 、 45° 和 135° 这3个方向的梯度值,找到当中的最小值,设为 $v(i, k)$ 。设置特定阈值 T 作为区分噪声和边缘纹理的标准,当栅栏图像块中的任一像素点的梯度值 $v(i, k)$ 大于特定阈值 T 即划分为噪声点。特定阈值 T 用最大类间方差法(Nobuyuki Otsu, OTSU)来确定,以图像灰度特性为初始阈值将块图像中的像素分为目标和背景两部分^[15]。如果目标和背景之间的类间方差越大,说明构成图像的这两个部分之间的差别就越大,计算两者之间的类间方差并使其最大,即可得到最佳的分割阈值 T ,OTSU的公式如下:

$$g = \sum_{i=1}^T p_i \sum_{i=T+1}^n p_i ([\sum_{i=1}^T p_i]^{-1} \sum_{i=1}^T ip_i - [\sum_{i=T+1}^n p_i]^{-1} \sum_{i=T+1}^n ip_i)^2 \quad (5)$$

式中:目标和背景的分割阈值 T 即为所求, p_i 为灰度值为 i 的像素的概率。

利用上述区分噪声和边缘纹理的方法对图像块中的所有像素点进行分析,则可得出子块中整体噪声的污染程度 $W(i,k)$ 为:

$$W(i,k) = \sum (v(i,k) - T) \quad (6)$$

对栅栏图像子块的噪声 $W(i,k)$ 进行加权平均,求取平均值,则整幅栅栏图像的噪声污染程度 S 为:

$$S = \frac{\sum \lambda_i W(i,k)}{M \times N} \quad (7)$$

式中: λ_i 为各子块的噪声权值, M, N 分别为直线电机运动过程中采集到的栅栏图像的长和宽。

则栅栏图像的 PSNR 为:

$$PSNR = 10 \lg \frac{l \times l}{S} \quad (8)$$

式中: l 为栅栏图像的灰度级数。利用式(8)就可以计算出采集到的栅栏图像的 PSNR 值,从而评价图像的质量,数值越高则表明图像的质量越好。

4 实验和数据分析

4.1 图像测量系统

由于本文的改进峰值信噪比算法是基于采集到图像来进行的,所以在优选之前搭建出测试平台。根据物体运动的相对原理,在图 2 动子位置测量原理装置的基础上,把所构造的非周期栅栏图像固定在动子上,而在直线电机底座的侧面固定一个高速相机,当动子带动目标栅栏图像运动时,高速相机就可以对栅栏图像进行连续拍摄并采集图像,就形成了如图 4 所示的测量平台。

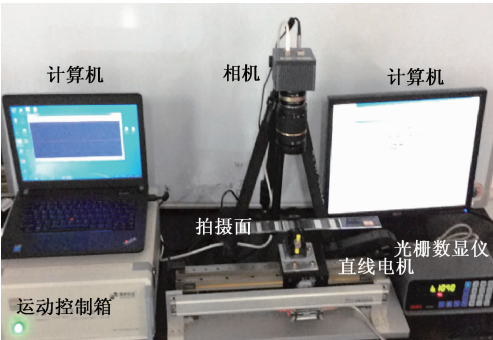


图 4 直线电机动子位置测量平台

Fig. 4 Linear motor rotor position detection system

在进行图像测量之前,要对测量系统进行标定,即确定电机动子实际位移与像机拍摄到的非周期栅栏图像像素位移的映射关系。测试平台中的电机为双次级 U 型电机,最大运行速度为 3 m/s,相机的分辨率为 $2\,048 \times 2\,048$ pixel。

直线电机动子运动的实际位移可以由光栅数显仪读出,高速相机拍摄到的栅栏图像的像素位移由相似性匹配计算得出。根据文献[16-17]的思想采用网格法进行系统标定,标定结果为畸变率 $\varepsilon = -0.003\,2$,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的小,且在实际的测量过程中水平比例因子取值为 1,这样就能有效的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 $\xi = 1.959\,7$ 。

4.2 实验结果与分析

通过改变栅栏图像的宽度标准差和灰度梯度和来构造出不同类型的非周期栅栏图像,由于栅栏图像是一种条纹相间的灰度图像,是以 256 级灰度色阶来表示的,那么会存在一种黑白相间的特殊灰度非周期栅栏图像,本文先对比灰度非周期栅栏图像和黑白非周期栅栏图像抗干扰性强弱,从而减少优选的耗时。逐渐增大宽度标准差和灰度梯度和这两个参数,分别构造 3 种不同灰度非周期栅栏图像和 3 种不同黑白非周期栅栏图像用于实验,并在直线电机动子运动过程中进行图像的采集,得到如图 5 所示的图像。

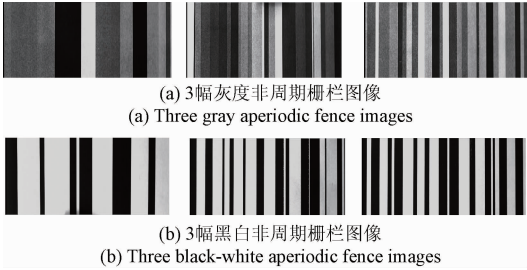


图 5 采集到的 6 幅非周期栅栏图像

Fig. 5 The collected six aperiodic fence images

计算这 6 幅图的 PSNR 值,再分别将这 6 幅图像平移(3,1) pixel 后用相位相关算法进行相似性计算,得出其相似性峰值,对比验证灰度非周期栅栏图像和黑白非周期栅栏图像的质量及抗干扰性,结果如表 1 所示。从表 1 看出,相比于黑白非周期栅栏图像,灰度非周期栅栏图像的 PSNR 值及相似性峰值明显的更高,图像的质量更优。

表 1 两种类型的非周期栅栏图像评价结果
Table 1 Two kinds of aperiodic fence evaluate results

采集到的图像	PSNR	相似性峰值
灰度非周期栅栏图像	40.964 3	0.931 1
	40.981 6	0.943 4
	40.990 2	0.969 8
黑白非周期栅栏图像	40.147 6	0.819 0
	40.703 0	0.835 7
	40.753 1	0.862 2

在电机定子位置测量中图像相位相关算法具有良好

的稳定性和精确性^[18]。图像相位相关算法利用互功率谱中的相位信息进行匹配,用互功率谱的峰值和尖峰数量来表征图像的抗干扰性能强弱,是图像匹配中用于位置测量的有效方法^[19]。为了进一步验证灰度非周期栅栏图像作为目标源图像比黑白非周期栅栏图像更有利于定子位置的精密测量,利用互功率谱的尖峰幅值和尖峰数量作为表征来进行验证,结果如图 6 和 7 所示。从图 6 和 7 可以看出,灰度非周期栅栏图像的互功率谱的峰值唯一,而黑白非周期栅栏图像的互功率谱有多个峰值且最高的峰值也较低。结果表明,灰度非周期栅栏图像比黑白非周期栅栏图像的抗干扰性更强,更加有利于直线电机定子位置的测量。

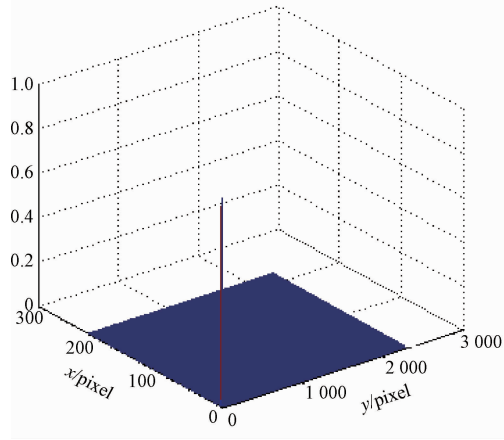


图 6 灰度栅栏图像互功率谱

Fig. 6 The cross power spectrum of the gray fence image

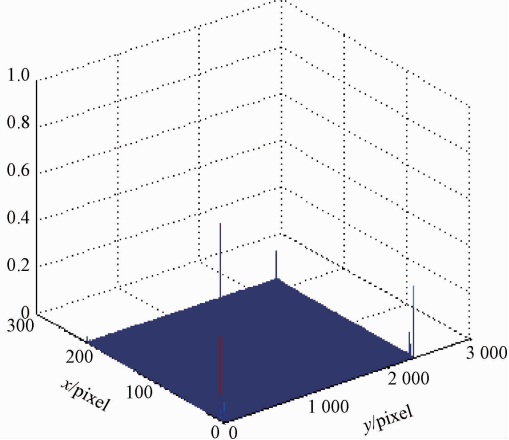


图 7 黑白栅栏图像互功率谱

Fig. 7 The cross power spectrum of black-white fence image

接下来进一步对灰度非周期栅栏图像进行优选,以宽度标准差和灰度梯度和为变化参数,规范这两个参数的取值区间,优选出能够满足直线电机定子位置高精度和抗干扰性测量的目标源图像。根据 canny 算法边缘检测精度以及图像采集过程中两幅相邻图像要有重叠信息^[19]的要求,以及测试平台和相机采集窗口的限制,栅

栏图像的单个条纹宽度取值范围在 $[11,27]$ pixel,所构造的栅栏图像最大灰度梯度和在 $[0,37\ 530]$ 变化,宽度标准差在 $[6.336\ 5,8.565\ 1]$ 变化。令宽度标准差在 $[6.336\ 5,8.565\ 1]$ 变化时灰度梯度和取一个定值以及灰度梯度和在 $[0,375\ 30]$ 变化时宽度标准差取一个定值,分析二者与图像的 PSNR 之间的变化波动,结果如图 8 所示。

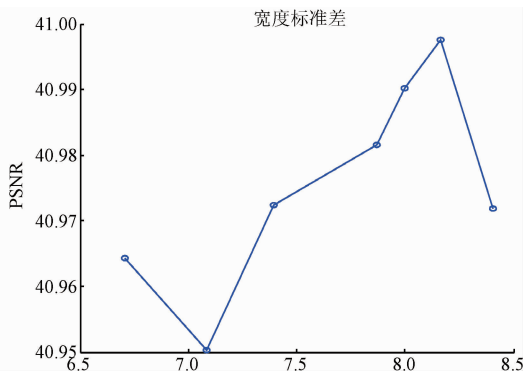
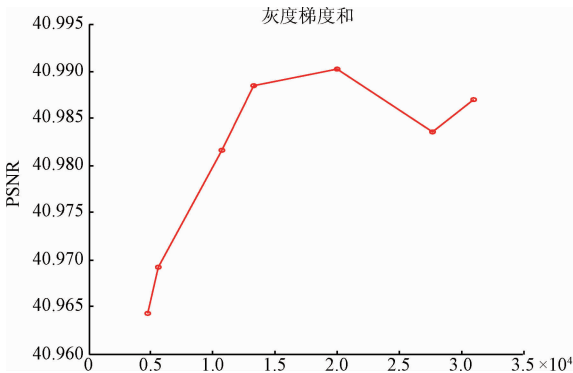


图 8 峰值信噪比变化曲线

Fig. 8 PSNR changing curve

由图 8 可以看出,灰度梯度和在 $[18\ 000,22\ 000]$ 、宽度标准差在 $[8.1,8.3]$ 之间变化时,图像的 PSNR 值明显高于其他范围内的值,此时的栅栏图像质量最优。

分别在宽度标准差为 $[8.1,8.3]$ 、灰度梯度和为 $[18\ 000,22\ 000]$ 取值范围内和取值范围外随机构造出 3 组灰度非周期栅栏图像,对比其 PSNR 值,结果如图 9 所示。从图 9 的 3 组数据对比来看,在区间内构造的灰度非周期栅栏图像的 PSNR 值明显的高于区间外取值构造的栅栏图像,图像所含的噪声量少,图像质量优,抗干扰性强。

进一步验证在区间内取值构造的灰度非周期栅栏图像用于直线电机动子位置测量时能够满足高精度的要求,分别在区间内和区间外取值构造出一个用于动子位置测量实验的灰度非周期栅栏图像,如图 10 所示,在不同的动子位移值情况下,得到如图 11 所示的位移绝对误差对比曲线。

从图 11 位移绝对误差曲线可以看出,在宽度标准差为 $[8.1,8.3]$ 、灰度梯度和为 $[18\ 000,22\ 000]$ 范围外取值构造的灰度非周期栅栏图像用于动子位移计算的绝对误差大于 0.039 mm ,而在此区间内构造的灰度非周期栅栏图像的绝对误差小于 0.028 mm 。因此,在该区间内构造的灰度非周期栅栏图像能满足直线电机动子位置的高精度测量,计算结果更加地接近真实值。

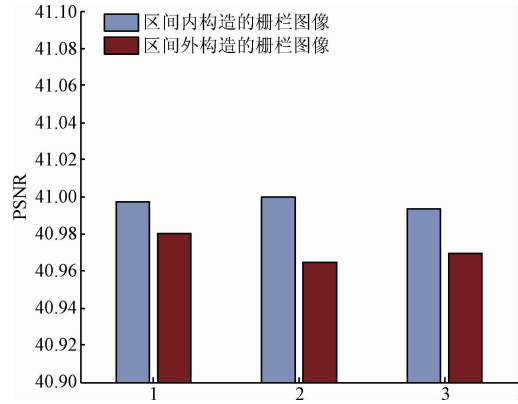


图 9 栅栏图像 PSNR 值对比柱状图

Fig. 9 The comparison bar chart of fence image's PSNR

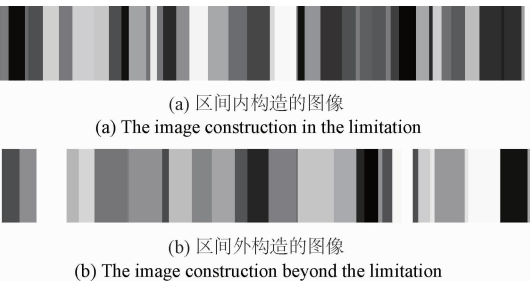


图 10 灰度非周期栅栏实验

Fig. 10 Experimental images of gray aperiodic fence

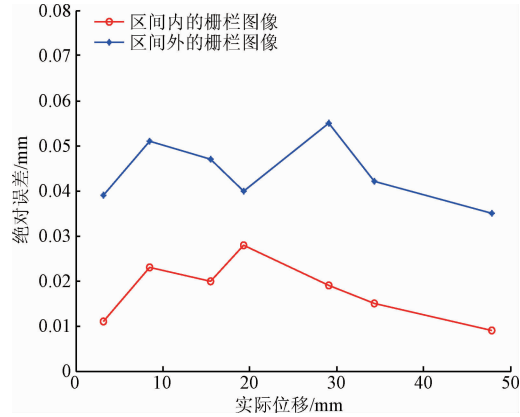


图 11 实际测量时的绝对误差

Fig. 11 Absolute error of the actual measurement

5 结 论

针对图像位置检测方法中原始拍摄面的选取问题做了分析,为了有效地抑制直线电机动子运动过程中产生的抖动对测量精度的影响。采用栅栏图像作为目标源图像,并通过改变条纹灰度梯度和值和宽度值来构造不同类型的非周期栅栏图像用于实验,在直线电机动子运动过程中进行图像的采集。在传统的峰值信噪比评价图像质量局限性上,提出了一种基于四叉树分解和剔除边缘纹理对噪声测量干扰的改进峰值信噪比方法来筛选抗干扰性强、质量高的非周期栅栏图像作为目标源图像。实验结果表明,相对于黑白非周期栅栏图像,灰度非周期栅栏图像的质量更高、抗干扰性更好。且在宽度标准差为 $[8.1,8.3]$ 、灰度梯度和为 $[18\ 000,22\ 000]$ 取值构造的灰度非周期栅栏图像,其 PSNR 值高,图像抗干扰性强,能够满足直线电机动子的高精度测量要求。

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.
[2] 汪旭东,夏涛,许孝卓,等. 永磁同步直线电机的粒子群 PID 空间矢量控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(5):655-661.
WANG X D, XIA T, XU X ZH, et al. Particle swarm PID space vector control of permanent magnet synchronous linear motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (5):

- 655-661.
- [3] SHUANG H H. Design of high precision magnetic grid displacement sensor[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008:185-188.
- [4] 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. Identification system of composite material damage based on FBG sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11):2894-2901.
- [5] ZARROUATI-VISSIÈRE N, ROUCHON P, BEAUCHARD K. Rotational and translational bias estimation based on depth and image measurements[C]. IEEE Decision and Control, 2012:6627-6634.
- [6] 王荔枝. 基于栅栏图像筛选的直线电机定子位置测量方法研究[D]. 合肥:安徽大学, 2014.
- WANG L ZH. Research of linear motor rotor position detection method based on fence image screening [D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [7] PHAM M H. Detecting the optimal active contour in the computed tomography image by using entropy to choose coefficients in energy equation [C]. International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2015: 41-44.
- [8] 范媛媛,桑英军,沈湘衡. 视觉掩盖效应下的无参考图像信噪比评价[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 711-716.
- FAN Y Y, SANG Y J, SHEN X H. No-reference image SNR assessment under visual masking [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 711-716.
- [9] 丁西明,段汉根,范益政. 四叉树分解的图像插值[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(20): 191-193.
- DING X M, DUAN H G, FAN Y ZH. Image interpolation via quadtree decomposition[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(20): 191-193.
- [10] 张芸,张伟,师奕兵,等. 基于远场涡流的管道局部缺陷定量评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 623-631.
- ZHANG Y, ZHANG W, SHI Y B, et al. Research on local defects quantification of pipes based on RFEC testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 623-631.
- [11] SINGH S, SINGH B. Effects of noise on various edge detection techniques [C]. International Conference on Computing for Sustainable Global Development, 2015: 827-830.
- [12] 赵泉华,高郡,李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2519-2530.
- ZHAO Q H, GAO J, LI Y. Multi-feature texture image segmentation based on tessellation technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2519 - 2530.
- [13] 林森,吴微,苑玮琦. 采用纹理近邻模式的掌静脉生物特征识别研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2330 - 2338.
- LIN S, WU W, YUAN W Q. Investigation on palm vein biometrics based on the texture neighbor patter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2330-2338.
- [14] 倪婧,王朔中,廖纯,等. 消除图像伪轮廓的各向异性自适应滤波[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(2): 219-226.
- NI J, WANG SH ZH, LIAO CH, et al. False contour suppression with anisotropic adaptive filtering [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(2): 219-226.
- [15] 李宝顺,王玮,包亚萍,等. 一种邻域均值加权最大类间方差的阈值分割法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(6): 1368-1372.
- LI B SH, WANG W, BAO Y P, et al. A thresholding segmentation method of neighborhood-mean weighed Ostu[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(6): 1368-1372.
- [16] 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.
- [17] 张凯,董菲,赵吉文,等. 基于图像熵的直线电机定子位置精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2821-2827.
- ZHANG K, DONG F, ZHAO J W, et al. Precise measurement of linear motor mover position using an improved digital image correlation based image entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2821-2827.
- [18] 赵吉文,黄彪,王荔枝,等. 基于图像求逆相位相关算法测量电机转子位置[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1613-1620.
- ZHAO J W, HUANG B, WANG L ZH, et al. Detection of motor rotor position based on image reversible phase-correlation algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1613-1620.

[19] ANDERS A, MARCHETTI A. Rotation invariant feature matching--based on Gaussian filtered log polar transform and phase correlation [C]. 8th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), 2013 ;107-112.

作者简介



窦少昆,2014 年于滁州学院获得学士学位,现为安徽大学硕士研究生,主要研究方向为图像测量技术。
E-mail: 15375101796@163.com

Dou Shaokun received his B. Sc. degree in 2014 from Chuzhou University. Now he is a master student in Anhui University. His main research interest is image measurement technology.



赵吉文(通讯作者),分别在 1996 年和 2002 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位,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,现为安徽大学电气工程与自动化学院副院长,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

Zhao Jiwen (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1996 and 2002, and his Ph. D. degree in 2005 from University of Science and Technology of China. Now he is the subdecanal of college of Electrical Engineering and Automation in Anhui University. His main research interests include high precision linear servo system and robot.