

文章编号 1004-924X(2019)04-0889-12

基于非周期正弦条纹的直线电机动子位置测量

赵吉文*, 官凯歌, 赵 静, 王 辉, 蒋 旭

(安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为了从目标拍摄源上提高直线电机动子位置检测的精度和抗干扰性,构造了一种非周期正弦条纹图像,并引入一种基于梯度法的图像亚像素测量方法,实现对动子位置的高精度测量。首先,改变正弦条纹的条纹周期,得到一系列非周期正弦条纹,并生成非周期正弦条纹图像;其次,采用图像的 Pnatt 熵优选出具有强鲁棒性的非周期正弦条纹图像;最后采用基于 Barron 算子的梯度法计算相邻目标图像的亚像素位移,结合标定系统物像标定系数,获得直线电机动子的实际位移。仿真和实验结果表明,对比于非周期栅栏图像,本文构造的非周期正弦条纹图像具有较强的鲁棒性,且测量精度达到 0.02 pixel。

关键词:直线电机;位置检测;非周期正弦条纹图像;栅栏图像;梯度法

中图分类号:TM301;H82 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192704.0889

Position measurement for linear motor mover based on aperiodic sinusoidal stripe image

ZHAO Ji-wen*, GONG Kai-ge, ZHAO Jing, WANG Hui, JIANG Xu

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

* Corresponding author, E-mail: ustczjw@ahu.edu.cn

Abstract: To improve the accuracy and anti-interference of the position detection of a linear motor mover from a target shooting source, an aperiodic sinusoidal stripe image was constructed and a sub-pixel measurement method based on the gradient method was introduced to achieve high-precision measurement of the mover position. First, by changing the stripe cycle of the sinusoidal stripe, an aperiodic sinusoidal stripe image was generated. Second, an aperiodic sinusoidal stripe image with strong robustness was selected by using the Pnatt entropy of the image. Finally, the subpixel displacement of the adjacent target image was calculated using the gradient method based on the Barron operator, and the actual displacement of the linear motor mover was obtained by combining the calibration coefficients of the calibration system. Simulation and experimental results show that when compared to the aperiodic fence image, the aperiodic sinusoidal stripe image has strong robustness and a measurement accuracy of 0.02 pixels.

Key words: linear motor; position measurement; aperiodic sinusoidal stripe image; fence image; gradient method

收稿日期:2018-08-06;修订日期:2018-10-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51837001, No. 51707002, No. 51637001, No. 51577001);安徽省教育厅项目资助(No. KJ2017A003);安徽省自然科学基金项目资助(No. 1808085QE123)

1 引言

直线伺服系统由于其结构简单、定位精度高且行程不受限制等特点,被广泛应用于精密加工领域,如激光切割机^[1-2]。直线电机动子位置的检测精度制约着伺服系统的控制精度,进而影响了产品的加工精度。

目前主要采用磁栅和光栅来进行直线电机动子的位置测量,二者在直线位置测量中均有一定的应用,但也有不足之处。磁栅易受到外部磁场干扰而导致退磁^[3],对工作环境要求较高;而光栅对安装精度有较高的要求,不能承受较大的冲击和振动,且高精度光栅价格昂贵^[4]。因此,研究一种新的直线电机动子位置的精密测量方法至关重要。

图像测量技术是一种新的位移测量方法,具有环境适应能力强、精度高等优点^[5-6],被广泛应用于目标跟踪和图像匹配等研究领域。可以将其引入直线电机动子的位置检测中,来提高动子位置的测量精度。数字图像测量方法是利用图像的灰度信息进行相关匹配获取运动参数^[7],其中目标源图像的选取对测量的精度和抗干扰性有很大影响。文献[8]介绍一种基于数字散斑图像的模糊复原处理方法,降低了噪声对直线电机动子位置测量的影响,但对图像进行复原预处理,增加了算法的复杂度;文献[9]选取周期正弦条纹图像确定目标物体的位移,但由于目标图像具有周期性,计算位移时需要考虑周期以避免信息重复,否则将导致测量误差增大。

环境中噪声与光照强度的变化会影响拍摄图像质量,进而影响到直线电机动子位置的测量精度,这就要求目标源图像应具有较强的鲁棒性。文献[10]根据直线电机仅在水平方向上运动的特点,介绍了一种基于栅栏图像的一维扩展相位相关算法,实现了直线电机动子位置的高精度检测。由于其选取的栅栏图像具有非周期性和强鲁棒性,对于提高测量精度和抗干扰性十分有利。但栅栏图像也有不足之处,栅栏图像横向上的单个条纹宽度内无灰度变化,利用图像的灰度信息进行匹配时,会降低匹配精度。

为了克服栅栏图像在单个条纹宽度内无灰度变化的不足,本文构造并优选了一种具有非周期性的正弦条纹图像用于直线电机动子位置检测,以提高测量精度。首先利用图像互功率谱的主峰

值大小及次峰数量来验证非周期正弦条纹图像的抗干扰性;根据图像 P_{natt} 熵的大小优选出具有强鲁棒性的非周期正弦条纹图像;最后引入基于 Barron 算子的梯度法计算目标图像亚像素位移值,实现直线电机动子位置的高精度测量。

2 直线电机动子位置测量系统

文献[11]采用一种基于栅栏图像的扩展相位相关算法(Phase Correlation Algorithm, PCA)来进行图像像素位移的计算,并选取具有较强鲁棒性的非周期栅栏图像作为目标源图像。图 1 为直线电机动子位置检测系统示意图。

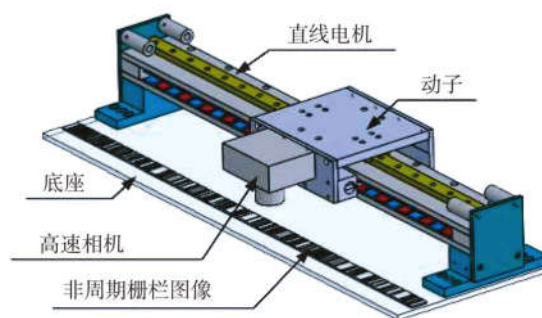


图 1 直线电机动子位置测量系统

Fig. 1 Linear motor mover position measuring system

在直线电机动子运动方向上,具有强鲁棒性的非周期栅栏图像安装在底座上,高速相机固定在动子侧面,其镜头垂直于水平拍摄面,避免相机采集的图像发生畸变,从而影响测量精度。当电机以一定速度稳定运行时,固定在动子上的相机随着动子而运动,并实时采集相邻时刻的非周期栅栏图像,然后对采集到的图像进行像素位移计算,再根据系统标定方法确定标定系数,将像素位移转换为动子的实际位移,从而实现动子位置的精确定位。

3 非周期正弦条纹图像的生成

分析非周期栅栏图像的非周期信息,采用 canny 算子边缘检测方法对栅栏图像进行边缘检测,提取其条纹宽度序列。将测得栅栏图像的每一个条纹宽度分别作为正弦条纹的每一个条纹周期,生成非周期正弦条纹,从而生成非周期正弦条纹图像。

3.1 非周期信息的提取

图像 $f(x, y)$ 的投影曲线代表着图像的灰度分布情况,将非周期栅栏图像进行一维投影,得到栅栏图像的非周期信息如图 2 所示。

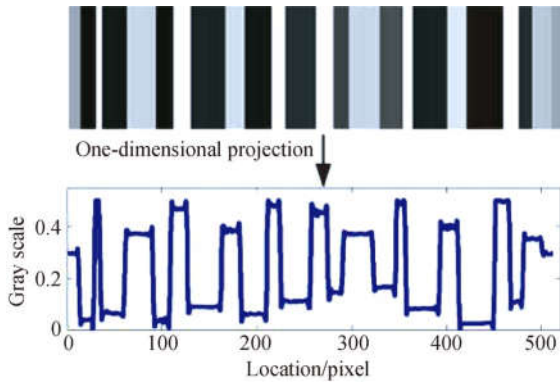


图 2 栅栏图像的非周期信息

Fig. 2 Aperiodic information of fence image

由图 2 可知,栅栏图像的条纹间虽然具有明显的灰度变化,但在单个条纹宽度内灰度却没有变化。栅栏图像的相邻条纹间有明显的边缘线,可以采用边缘检测算法测出边缘线得到条纹宽度序列。与其它边缘检测算法相比,canny 算子具有很强的去噪能力,能够检测到较弱的边缘信息^[12]。故本文采用 canny 算子边缘检测算法对非周期栅栏图像做边缘特征提取处理,得到栅栏图像的每个条纹宽度。图 3 为栅栏图像经过边缘提取后的边缘特征图像。



图 3 边缘特征图

Fig. 3 Edge feature image

3.2 非周期正弦条纹图像的生成

将测得的非周期栅栏图像的条纹宽度序列作为正弦条纹的条纹周期,每一个条纹宽度对应一个条纹周期,不等的条纹宽度对应不同的条纹周期,由此可得到非周期正弦条纹,其在水平方向上都有灰度变化,且具有非周期性。如图 4 所示为非周期正弦条纹。

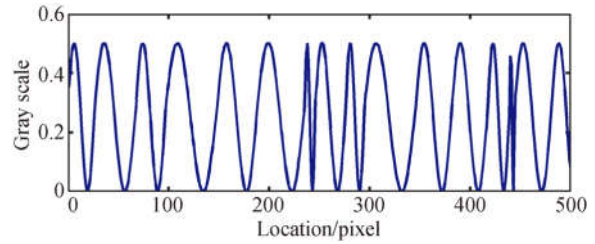


图 4 非周期正弦条纹

Fig. 4 Aperiodic sinusoidal stripe

通过控制正弦条纹的条纹周期的变化,可以得到一系列非周期正弦条纹,并生成非周期正弦条纹图像,如图 5 所示。

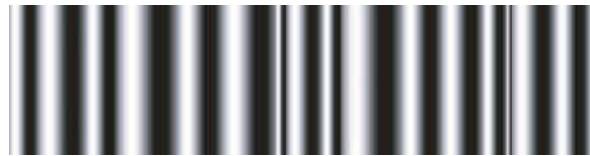


图 5 非周期正弦条纹图像

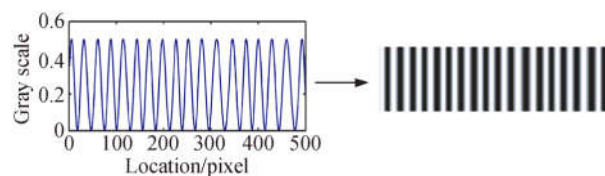
Fig. 5 Aperiodic sinusoidal stripe image

由图 5 可知,非周期正弦条纹图像在水平方向上处处均有灰度变化。在理想情况下,直线电机仅在水平方向上有位移,非周期正弦条纹图像在垂直方向上的图像灰度信息具有一致性,即灰度无变化。

4 非周期正弦条纹图像的优选

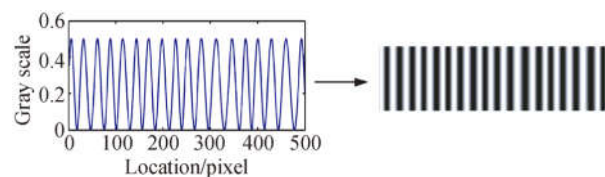
4.1 正弦条纹图像的分类

通过改变正弦条纹的条纹周期,会产生周期正弦条纹、近似周期正弦条纹及非周期正弦条纹 3 种不同类型的正弦条纹图像,如图 6 所示。



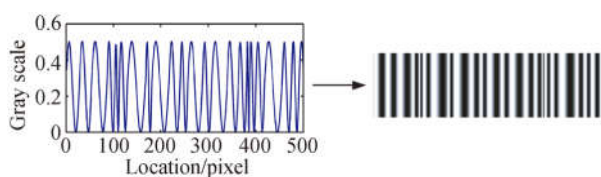
(a) 周期正弦条纹图像

(a) Periodic sinusoidal stripe image



(b) 近似周期正弦条纹图像

(b) Approximate periodic sinusoidal stripe image



(c)非周期正弦条纹图像

(c)Aperiodic sinusoidal stripe image

图 6 不同类型的正弦条纹图像

Fig. 6 Different types of sinusoidal stripe images

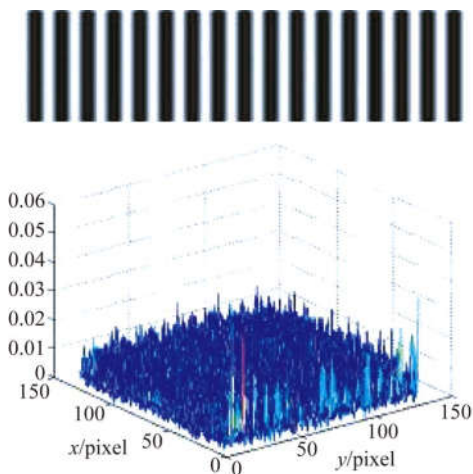
本文采用 PCA 计算图像的互功率谱,通过功率谱的峰值大小来判断图像的抗干扰性能^[13]。若图像互功率谱的主峰值越大,越尖锐,周围次峰值越小,则图像的抗干扰性越强。分别对 3 种不同类型的正弦条纹图像及栅栏图像(条纹宽度与非周期正弦条纹图像的条纹周期相同)添加(0,0.5)的高斯噪声(图像为 double 类),其服从均值为 0、方差为 0.5 的标准正态分布,再分别将这 4 幅图像平移(3.251,0)后用 PCA 进行位移计算,并得出其峰值大小,结果如表 1 所示。

表 1 PCA 位移和峰值检测结果

Tab. 1 PCA displacement and peak detection results

检测图像	位移/pixel	峰值
周期正弦条纹图像	3	0.047
近似周期正弦条纹图像	3	0.115
非周期正弦条纹图像	3	0.274
非周期栅栏图像	3	0.203

图 7 为不同类型图像及其添加(0,0.5)高斯噪声后的互功率谱峰值图。



(a)周期正弦条纹图像

(a)Periodic sinusoidal stripe image



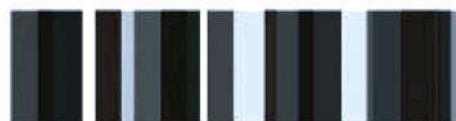
(b)近似周期正弦条纹图像

(b)Approximate periodic sinusoidal stripe image



(c)非周期正弦条纹图像

(c)Aperiodic sinusoidal stripe image



(d)非周期栅栏图像

(d)Aperiodic fence image

图 7 添加高斯噪声(0,0.5)不同类型图像的互功率谱图

Fig. 7 Cross power spectrum of different types image under Gaussian noise (0,0.5)

从表1和图7中可看出,周期正弦条纹图像的互功率谱有多个次峰、参差不齐,且最高峰值仅为0.047;近似周期正弦条纹图像的互功率谱有多个主峰,且分布在两端,计算时容易造成方向误判,其最高峰值为0.115;而非周期正弦条纹图像的互功率谱仅有一个主峰,且没有干扰次峰,最高峰值为0.274;非周期栅栏图像仅有一个主峰且没有次峰,其最高峰值为0.203。非周期正弦条纹图像互功率谱的相似性峰值更高,尖峰数量更少,故非周期正弦条纹图像的抗干扰性高于其他图像。

4.2 基于图像 Pnatt 熵的目标图像优选

文献[14]采用图像 Pnatt 熵来筛选非周期栅栏图像,本文引用该方法对非周期正弦条纹图像进行优选。首先利用正弦条纹的条纹周期的变化构造出一系列的非周期正弦条纹图像,计算出每个非周期正弦条纹图像的 Pnatt 熵;再根据图像 Pnatt 熵大小优选出具有较强鲁棒性的非周期正弦条纹图像作为目标拍摄源。

对于图像 $f(x, y)$, 其每一个像素都对应着一个特殊的位置和数值,若像素所处的位置不同,则其所表现的灰度也不同。若每个像素的灰度不相关,则熵的定义如下所示:

$$H = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log(p(x_i)), \quad (1)$$

式中: $n=2^B$ 表示图像的灰度级, x_i 为像素灰度, $p(x_i)$ 为各灰度级出现的概率。

一般情况下,图像像素之间的相关性很强,因此熵的计算必须考虑图像像素之间的相关性。设图像尺寸为 $M \times N$, 则有 Pnatt 熵定义为[15]:

$$H(\bar{f}) = - \sum_{q=1}^{M \times N} H[f_q | f_{q-1}, f_{q-2}, \dots, f_2, f_1], \quad (2)$$

式中: $H[f_q | f_{q-1}, f_{q-2}, \dots, f_2, f_1] = - \sum_{i=1}^T p(\bar{f}) \log p(f_q | f_{q-1}, f_{q-2}, \dots, f_2, f_1)$, $T=2^{MN}$, T 表示像素的灰度级数, q 代表每个像素, f 代表每个像素出现的灰度值。

由式(2)可知,如果相邻像素之间的相关性越大,那么图像的 Pnatt 熵值就越小;而 Pnatt 熵值越大,相邻像素之间的相关性就越低。

图像熵值的大小代表着像素相关性的高低, Pnatt 熵值越大,则拍摄的两幅图像的重叠区域

所包含的信息越多,即拥有更多的显著特征用来做图像相关;即使是有微小重叠区域,所含信息仍然具有很大的差异性,也有很好的抗干扰性,更有利于计算得到精确测量结果。

根据 Pnatt 熵的大小,选出3种不同类型的非周期正弦条纹图像,如图8(a)~8(c)所示。



图8 不同类型的非周期正弦条纹图像

Fig. 8 Different types of aperiodic sinusoidal stripe image

5 基于非周期正弦条纹图像的位移计算

由表1可看出,PCA仅能计算出整像素位移,不能到达亚像素的测量精度,因此PCA测量误差较大。首先采用PCA计算出相邻两幅目标图像的整像素位移值 (x_0, y_0) [11],为确定相邻图像的精确像素位移,还需进一步确定亚像素位移值。本文引入一种基于Barron算子的梯度法的亚像素测量方法,梯度法要求目标图像具有明显的灰度变化[16]。非周期正弦条纹图像在水平方向上处处有灰度变化,且具有非周期性,能够避免周期内信息重复,此外,其抗干扰性强于其它正弦条纹图像,故非周期正弦条纹图像适用于基于梯度法的直线电机定子位置检测。

5.1 基于梯度法的图像亚像素测量

梯度法首先是利用位移前后的相邻两幅图像 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的灰度梯度值建立目标函数, 然后再对目标函数求极值得到极值点, 以此来获得亚像素的位移^[17]。对 $g(x+x_0+\Delta x, y+y_0+\Delta y)$ 在点 $(x+x_0, y+y_0)$ 展开泰勒级数并舍去高阶无穷小量, 则:

$$g(x+x_0+\Delta x, y+y_0+\Delta y) = g(x+x_0, y+y_0) + \Delta x g_x + \Delta y g_y + \frac{1}{2}(\Delta x)^2 g_{xx} + \Delta x \Delta y g_{xy} + \frac{1}{2}(\Delta y)^2 g_{yy}, \quad (3)$$

式中: g_x, g_y 均为 $g(x+x_0, y+y_0)$ 的一阶梯度; g_{xx}, g_{xy}, g_{yy} 均为 $g(x+x_0, y+y_0)$ 的二阶梯度; $(\Delta x)^2, (\Delta y)^2$ 为高阶小量。

梯度 g_x, g_y 的计算采用计算结果准确、性能稳定的 Barron 算子^[16]:

$$g_x = \frac{1}{12}g(x-2, y) - \frac{8}{12}g(x-1, y) + \frac{8}{12}g(x+1, y) - \frac{1}{12}g(x+2, y), \quad (4)$$

$$g_y = \frac{1}{12}g(x, y-2) - \frac{8}{12}g(x, y-1) + \frac{8}{12}g(x, y+1) - \frac{1}{12}g(x, y+2). \quad (5)$$

令 $g(x', y') = g(x+x_0, y+y_0) + \Delta x g_x + \Delta y g_y$, 则新的目标函数为:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \sum \sum [f(x, y) - g(x', y')]^2, \quad (6)$$

其中 Δx 和 Δy 应满足:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum \sum g_x^2 & \sum \sum g_x g_y \\ \sum \sum g_x g_y & \sum \sum g_y^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum \sum [f(x, y) - g(x+x_0, y+y_0)] g_x \\ \sum \sum [f(x, y) - g(x+x_0, y+y_0)] g_y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

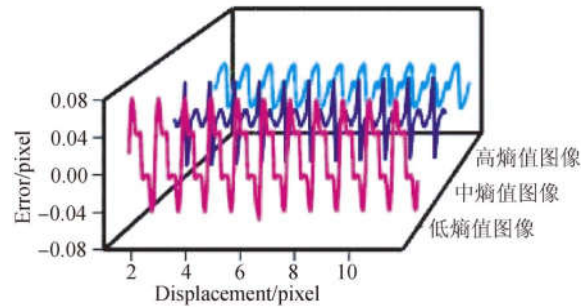
根据上文 PCA 求得的整像素位移 (x_0, y_0) , 可得最终相邻两幅目标图像的位移值 $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y)$ 。

5.2 对比验证

5.2.1 不同熵值非周期正弦条纹图像的测量精度与抗干扰性对比

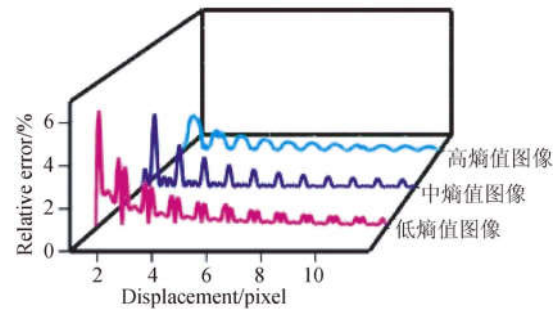
为了验证不同熵值的非周期正弦条纹图像对

测量精度的影响, 分别将图 8(a)~8(c) 的 3 幅不同类型的非周期正弦条纹图像平移不同的位移, 采用 PCA 和梯度法求图像的像素位移, 并将其与设定位移值对比。对测量结果进行处理分析, 绘制相应的误差曲线如图 9 所示。



(a) 误差曲线

(a) Error curve



(b) 相对误差曲线

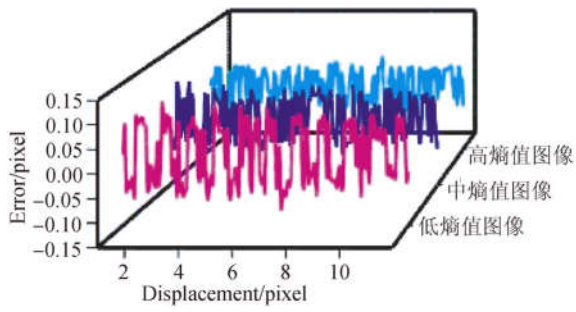
(b) Relative error curve

图 9 3 种不同熵值图像的对比结果

Fig. 9 Comparisons of three different entropy images

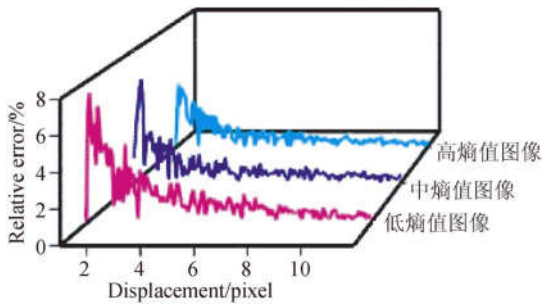
图 9(a) 比较了不同熵值图像的测量误差曲线, 其中高熵值的非周期正弦条纹图像的测量结果误差最小, 其测量误差范围为 $-0.021 \sim 0.026$ pixel, 比其它两种非周期正弦条纹图像的测量结果更稳定; 图 9(b) 表明 3 种不同熵值的非周期正弦条纹图像的测量相对误差分别低于 5.722% , 3.803% 和 1.940% , 而高熵值非周期正弦条纹图像的相对误差最小。由此表明高熵值非周期正弦条纹图像的测量结果最接近设定值。

为验证不同熵值对图像抗干扰性的影响, 分别对 3 种不同熵值的非周期正弦条纹图像添加 $(0, 0.0005)$ 的高斯噪声 (图像为 double 类), 再平移不同位移, 将设定位移与计算的图像像素位移进行比较。处理分析测量结果, 绘制相应的误差曲线如图 10 所示。



(a) 误差曲线

(a) Error curve



(b) 相对误差曲线

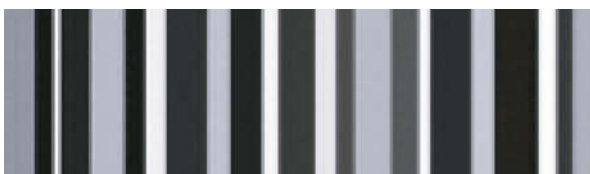
(b) Relative error curve

图 10 3 种不同熵值图像在高斯噪声下的对比结果
Fig. 10 Comparative results of three different entropy images under Gauss noise

图 10(a)表明在添加高斯噪声的情况下,高熵值的非周期正弦条纹图像测量误差最小,低于 0.050 pixel。图 10(b)可知在高斯噪声下 3 种不同熵值图像的测量相对误差分别低于 7.393%, 6.281%和 4.052%。由此可知,高熵值非周期正弦条纹图像的抗干扰性能更好。

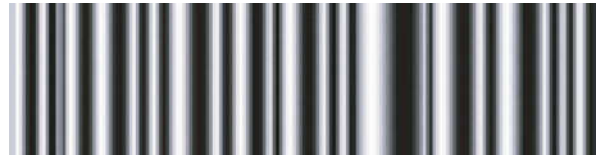
5.2.2 非周期栅栏图像与非周期正弦条纹图像的测量精度与抗干扰性对比

为验证非周期栅栏图像(条纹宽度与非周期正弦条纹的周期相同)与非周期正弦条纹图像的测量精度,选择如图 11 所示的 2 幅不同类型的图像。



(a) 非周期栅栏图像

(a) Aperiodic fence image

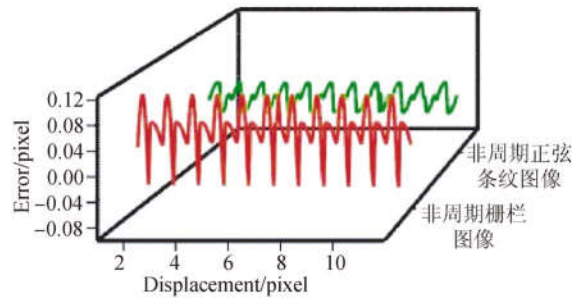


(b) 非周期正弦条纹图像

(b) Aperiodic sinusoidal stripe image

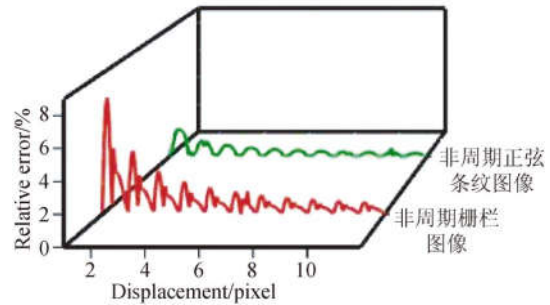
图 11 不同类型的图像
Fig. 11 Different types of images

分别将非周期栅栏图像与非周期正弦条纹图像平移不同位移,将计算的图像像素位移与设定位移对比。分析其测量精度,绘制出相应的测量结果误差曲线如图 12 所示。



(a) 误差曲线

(a) Error curve



(b) 相对误差曲线

(b) Relative error curve

图 12 不同类型图像的对比结果

图 12 Comparative results of different types of images

图 12(a)可知非周期栅栏图像测量误差范围为 $-0.065 \sim 0.089$ pixel,非周期正弦条纹图像的测量误差范围为 $-0.022 \sim 0.026$ pixel;图 12(b)可看出非周期栅栏图像的测量相对误差明显高于非周期正弦条纹图像的测量相对误差。

为验证非周期栅栏图像与非周期正弦条纹图像的抗干扰性,分别对上述两幅不同类型图像添加 $(0, 0.0005)$ 的高斯噪声(图像为 double 类),

再平移不同位移,将计算的图像位移与设定位移对比,分析测量精度,绘制出相应的测量结果误差曲线如图 13 所示。

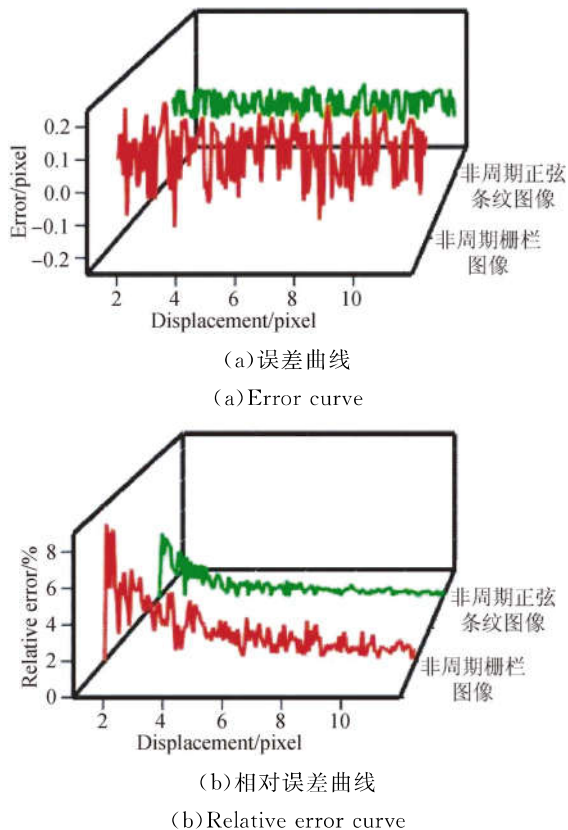


图 13 不同类型图像在高斯噪声下的对比结果

Fig. 13 Comparative results of different types of images under Gauss noise

图 13(a)表明非周期栅栏图像的测量误差范围为 $-0.215 \sim 0.188$ pixel,最大测量误差为 0.215 pixel;而非周期正弦条纹图像的测量误差范围为 $-0.051 \sim 0.054$ pixel,其最大测量误差为 0.054 pixel。图 13(b)表明在高斯噪声下两种不同类型图像的测量相对误差分别小于 8.471% 和 4.052%。

相比之下,非周期正弦条纹图像的测量结果更稳定、更接近设定值,且具有较强的抗干扰性。

6 实验结果分析

6.1 实验测试平台

根据直线电机动子位置测量系统搭建了测量实验平台,测量实验装置组成如图 14 所示。为了

便于实验,根据相对运动原理,实验时固定高速相机,让目标源图像随动子运动^[18]。



图 14 实验测试平台

Fig. 14 Experimental test platform

实验选用 U 型直线电机,运行速度范围为 $0 \sim 1$ m/s,有效行程为 380 mm,高速相机品牌型号是 Revealor/5F04M,其分辨率是 $1\ 024 \times 1\ 024$,光栅品牌型号是 SINO/KA-300,其最大量程为 420 mm,分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 。本文实验方案如下:高速相机拍摄相邻时刻的目标图像 f_1 和 f_2 ,首先采用 PCA 计算图像 f_1 和 f_2 之间的整像素位移 x_0 ,在此基础上再结合梯度法求得亚像素位移 Δx ;然后确定系统标定系数 ϵ ,则直线电机动子的实际位移为 $s = \epsilon \cdot (x_0 + \Delta x)$,并以高精度光栅作为基准参考,分析不同目标源图像的测量误差。

系统标定就是确定单位像素所对应的实际位移距离单位。首先将刻度清晰的刻度尺置于相机下并采集一张图像,再将其进行二值化处理,可得到二值化后的刻度尺图像,根据刻度尺实际长度对应的像素数,即可得到单位像素对应的实际长度^[19],本文的系统标定系数 $\epsilon = 0.079$ mm/pixel,表示每像素对应的实际距离为 0.079 mm。本文通过选取图像的一部分作为计算区域,能够有效地减小镜头畸变的测量误差,因此镜头的畸变率可以忽略不计。

6.2 实验结果对比与分析

当图像测量方法应用于工业上的直线电机动子位置测量时,其目标图像通过激光加工雕刻或有机玻璃彩印机打印在电机的底座上。在复杂的工业环境中,该图像不易受污染、磨损,能够长时间使用。由于条件的限制,本实验中将计算机生成的目标图像纸质打印安装在动子上方,选取的

各图像尺寸均为 33 mm×400 mm,以确保相机采集过程中不出现图像缺失的情况。

控制直线电机以一定速度运动,LED 补光灯调整光照强度,照度计测得此时的光照强度为 10 000 Lux,此时拍摄的图像实例如图 15 所示。

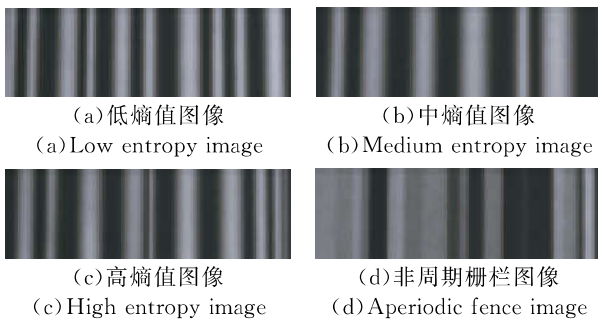


图 15 光照强度为 10 000 Lux 时图像采集实例
Fig. 15 Image acquisition example under the light intensity of 10 000 Lux

为验证不同熵值的图像对测量精度的影响,将测得动子的实际位移与高精度光栅作对比,绘制相应的误差曲线如图 16 所示。

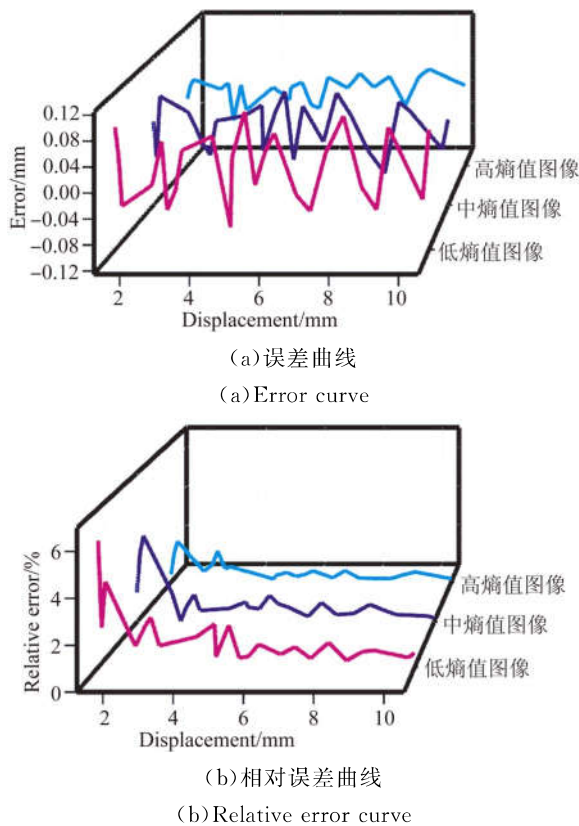


图 16 不同熵值图像在光照强度为 10 000 Lux 时实验结果
Fig. 16 Experimental results of different entropy images under the light intensity of 10 000 Lux

图 16(a)表明通过比较不同熵值图像的测量误差曲线,高熵值非周期正弦条纹图像的误差波动范围最小,在-0.044~0.049 mm 之间浮动,测量结果更稳定;从图 16(b)可看出 3 种非周期正弦条纹图像的测量相对误差分别低于 5.895%,4.061%和 2.048%。由此可知,高熵值非周期正弦条纹图像的实验测量精度更高。

为验证栅栏图像与非周期正弦条纹图像的测量精度,保持实验条件不变,计算出电机定子位置的实际位移,测量结果曲线如图 17 所示。

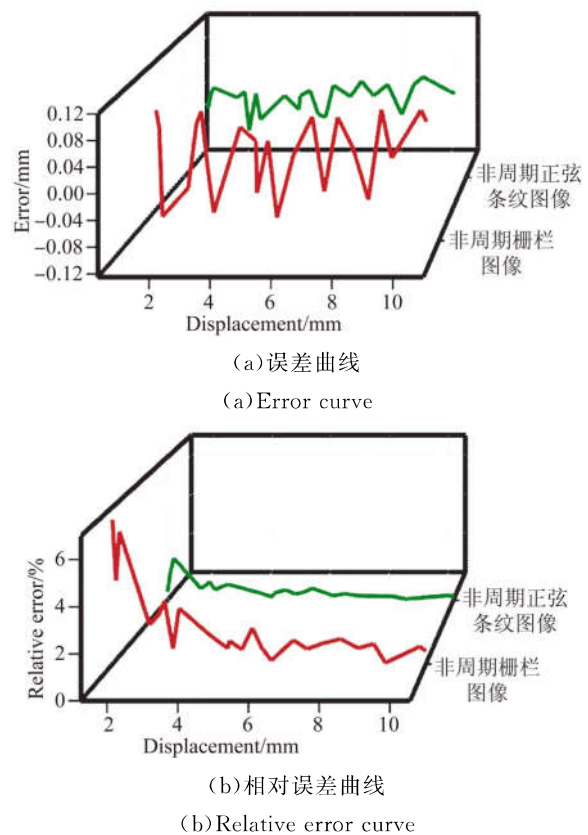


图 17 不同类型图像在光照强度为 10 000 Lux 时实验结果
Fig. 17 Experimental results of different types images under the light intensity of 10 000 Lux

由图 17(a)可知两种目标图像的测量误差范围分别为-0.089~0.082 mm,-0.044~0.049 mm。图 17(b)可看出非周期正弦条纹图像的测量相对误差曲线一直低于非周期栅栏图像的测量相对误差曲线。相比之下,非周期正弦条纹图像的测量精度更高且测量结果更稳定。

为了验证光照强度对测量精度的影响,LED 补光灯调整光照强度,照度计测得光照强度为

4 800 Lux,控制电机以一定速度运动。此时拍摄的图像实例如图 18 所示。

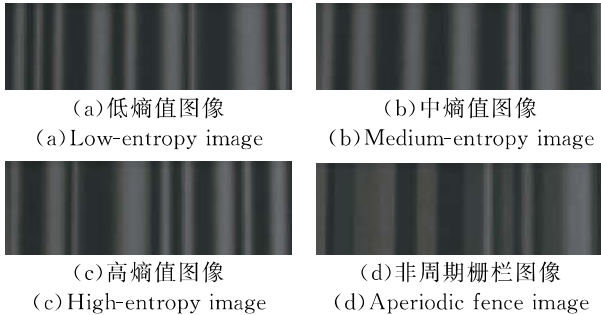


图 18 光照强度为 4 800 Lux 时图像采集实例

Fig. 18 Image acquisition example under the light intensity of 4 800 Lux

为验证光线变化时,图像对测量精度的影响,计算出直线电机动子的实际位移,绘制出相应的误差曲线如图 19 所示。

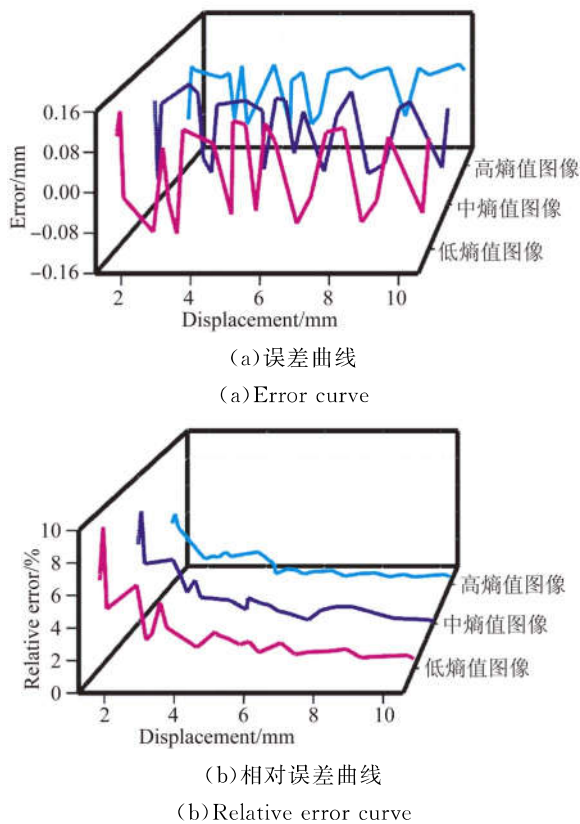


图 19 不同熵值图像在光照强度为 4 800 Lux 时实验结果
Fig. 19 Experimental results of different entropy images under the light intensity of 4 800 Lux

由图 19(a)可知,不同熵值图像的测量误差

范围分别为 $-0.129 \sim 0.123$ mm, $-0.104 \sim 0.104$ mm, $-0.068 \sim 0.073$ mm;从图 19(b)可看出 3 种图像的测量相对误差分别为 9.003%, 7.639%, 5.066%。由以上分析可知,高熵值的非周期正弦条纹图像在光线变暗时测量结果最接近于实际值,图像的抗干扰能力最强。

为验证光线变化时,非周期栅栏图像与非周期正弦条纹图像的对测量精度的影响,光照强度为 4 800 Lux,绘制相应的误差曲线如图 20 所示。

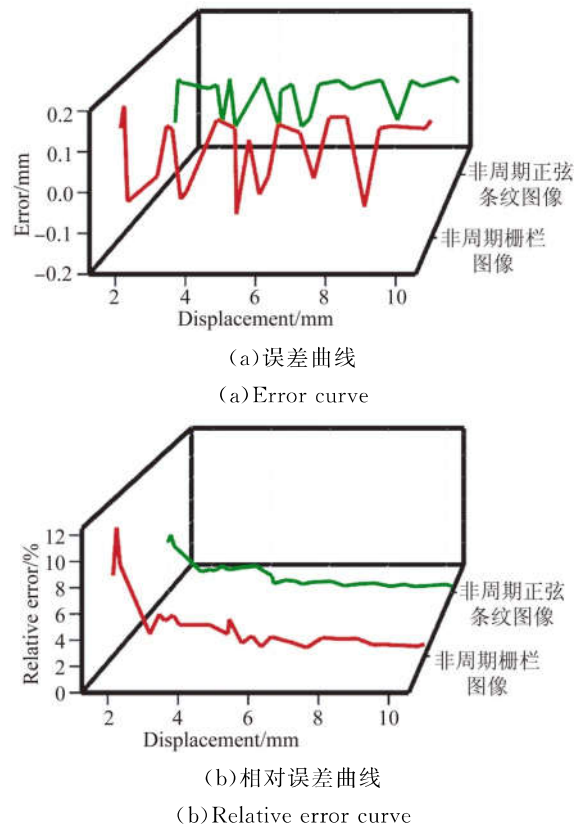


图 20 不同类型图像在光照强度为 4 800 Lux 时实验结果
Fig. 20 Experimental results of different types images under the light intensity of 4 800 Lux

图 20(a)表明在光线变暗时,非周期栅栏图像的测量误差范围为 $-0.140 \sim 0.141$ mm,非周期正弦条纹图像的测量误差范围为 $-0.068 \sim 0.073$ mm;图 20(b)表明两种不同类型图像的测量相对误差分别低于 10.315%, 5.066%。由以上实验结果可知,非周期正弦条纹图像的测量结果更稳定,抗干扰性更强。

环境中光线的变化对拍摄图像的质量影响较大,而图像的质量又直接影响测量的精度。因此在设置亮度时,要保证光照能够满足拍摄清晰的

要求,获取的图像轮廓清晰时,测量效果较好。

7 结 论

本文分析了栅栏图像在单个条纹宽度无灰度变化的不足,构造并优选了一种具有较强鲁棒性的非周期正弦条纹图像,从目标拍摄源上提高直线电机定子位置检测的精度和抗干扰性。介绍了系统测量原理并搭建了定子位置检测实验平台,

进行了一系列对比实验。实验结果表明:本文构造的非周期正弦条纹图像克服了栅栏图像的不足,从目标拍摄源上提高了直线电机定子位置测量的精度。本文构造的非周期正弦条纹图像具有较强的鲁棒性,将其作为直线电机定子位置检测的目标源图像,提高了不同光照和噪声水平下的鲁棒性。基于非周期正弦条纹的直线电机定子位置测量方法能够精确检测定子位置,测量系统具有较高的稳定性。

参考文献:

- [1] 李立毅,唐勇斌,刘家曦,等. 多种群遗传算法在无铁芯永磁直线同步电机优化设计中的应用 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):69-77.
LI L Y, TANG Y B, LIU J X, *et al.*. Application multiple population genetic algorithm in optimum design of air-core permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2013,33(15):69-77. (in Chinese)
- [2] 彭兵,宋得雪,张因,等. V-型端齿削弱永磁直线电机端部磁阻力波动方法 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3940-3946.
PENG B, SONG D X, ZHANG N, *et al.*. An end effect detent force reduction method of v-shaped end teeth in permanent magnet linear motors [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2016,36(14):3940-3946. (in Chinese)
- [3] LIU J Z, HAO S H, CHEN T. Design of absolute magnetic grid displacement sensor based on encoding principle [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2011, 88-89:336-340.
- [4] 刘华,卢振武,熊峥,等. 绝对式光栅尺母尺刻划曝光系统 [J]. 光学精密工程,2014(7):1814-1819.
LIU H, LU ZH W, XIONG ZH, *et al.*. Exposure optical system in lithographic main scale of absolute optical encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014(7):1814-1819. (in Chinese)
- [5] 葛朋祥,叶沛,李桂华. 基于遗传算法的数字图像相关法在微位移测量中的应用 [J]. 光学学报,2018,38(6):206-211.
GE P X, YE P, LI G H. Application of digital image correlation method based on genetic algorithm in micro-displacement measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018,38(6):206-211. (in Chinese)
- [6] 赵吉文,黄彪,王荔枝,等. 基于图像求逆相位相关算法检测电机转子位置 [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]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(6):1613-1620. (in Chinese)
- [7] 孙辉,李志强,孙丽娜,等. 一种空域和频域相结合的运动图像亚像素配准技术 [J]. 中国光学,2011,4(2):154-160.
SUN H, LI ZH Q, SUN L N, *et al.*. Sub-pixel registration of special and frequency domains for video sequences [J]. *Chinese Optics*, 2011,4(2):154-160. (in Chinese)
- [8] 赵吉文,窦少昆,赵静,等. 散斑运动模糊复原的直线电机定子位置检测 [J]. 光学精密工程,2018,26(2):363-370.
ZHAO J W, DOU SH K, ZHAO J, *et al.*. Linear electric motor rotor position measurement based on restoration of motion blur speckle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(2):363-370. (in Chinese)
- [9] LEE B, KIM E H, KIM H, *et al.*. Profilometry without phase unwrapping using multi-frequency and four-step phase-shift sinusoidal fringe projection [J]. *Optics Express*, 2009,17(10):7818-7830.
- [10] WANG H, ZHAO J, ZHAO J, *et al.*. A new rapid-precision position measurement method for linear motor mover based on 1-D EPCA [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, (99):7485-7494.
- [11] WANG H, ZHAO J, ZHAO J, *et al.*. Position detection method of linear motor mover based on extended phase correlation algorithm [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017, 11(7):921-928.
- [12] ZHAO H, QIN G, WANG X. Improvement of canny algorithm based on pavement edge detection

- [C]. *International Congress on Image and Signal Processing*. IEEE, 2010: 964-967.
- [13] WAN X, LIU J, YAN H. The Illumination robustness of phase correlation for image alignment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5746-5759.
- [14] 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 position using an improved digital image correlation based image entropy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(12): 2821-2827. (in Chinese)
- [15] 朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究 [J]. *光学精密工程*, 2004(5): 537-542.
ZHU ZH T, LI SH F, CHEN H P. Research on auto-focused function based on the image entropy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004(5): 537-542. (in Chinese)
- [16] 潘兵, 续伯钦, 李克景. 梯度算子选择对基于梯度的亚像素位移算法的影响 [J]. *光学技术*, 2005(1): 26-31.
PAN B, XU B Q, LI K J. Performance of gradient operators in algorithm of gradient-based subpixel registration [J]. *Optical Technique*, 2005(1): 26-31. (in Chinese)
- [17] 刘红亮, 陈维义, 许中胜. 曲面拟合法和梯度法相结合的图像亚像素配准算法 [J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(5): 180-185.
LIU H L, CHEN W Y, XU ZH SH. An image sub-pixel registration algorithm based on combination of curved surface fitting method and gradient method [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(5): 180-185. (in Chinese)
- [18] 王辉, 赵静, 赵吉文, 等. 基于 SVD 的直线电机定子位置的高精度测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9): 2101-2107.
WANG H, ZHAO J, ZHAO J W, *et al.*. An ultra-precision measurement method based on the SVD for the linear motor mover position [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9): 2101-2107. (in Chinese)
- [19] 邓辉, 谢俊, 孟广月, 等. 基于机器视觉的重复定位精度测量技术 [J]. *电子测量技术*, 2014, 37(12): 45-48.
DENG H, XIE J, MENG G Y, *et al.*. Repeat positioning accuracy measurement technology based on machine vision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(12): 45-48. (in Chinese)

导师简介:



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年博士后出站,主要从事高精度直线伺服系统、机器人等的研究。E-mail: ustczjw@ahu.edu.cn



宫凯歌(1993—),男,安徽淮北人,硕士研究生,2017年于合肥师范学院获得学士学位,主要研究方向为图像测量技术的研究。E-mail: 814435147@qq.com