

控制与决策

Control and Decision

基于图像增强局部上采样SSD的直线电机定子非接触位置检测方法

胡冬波, 赵吉文, 张晓虎

引用本文:

胡冬波, 赵吉文, 张晓虎. 基于图像增强局部上采样SSD的直线电机定子非接触位置检测方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1629–1636.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1781>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[变压器油下图像增强算法](#)

Image enhancement algorithm under transformer oil

控制与决策. 2023, 38(4): 1101–1108 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1595>

[基于直线特征约束网格变形的航拍图像拼接](#)

Linear-preserve-mesh warps in aerial image stitching

控制与决策. 2022, 37(3): 669–675 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1322>

[基于时序上采样卷积神经网络的风机叶片结冰检测](#)

Icing detection of wind turbine blade based on the time-dimensional upsampling convolutional neural network

控制与决策. 2022, 37(8): 2017–2025 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1657>

[基于多层次特征的机械臂单阶段抓取位姿检测](#)

Single-stage grasp pose detection of manipulator based on multi-level features

控制与决策. 2021, 36(8): 1815–1824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1840>

[复杂背景下全景视频运动小目标检测算法](#)

Panoramic video motion small target detection algorithm in complex background

控制与决策. 2021, 36(1): 249–256 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0686>

基于图像增强局部上采样 SSD 的直线电机动子 非接触位置检测方法

胡冬波, 赵吉文[†], 张晓虎

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 研究一种基于图像增强局部上采样平方差和 (IE-LUSSD) 的高精度亚像素检测算法, 以提高直线电机动子位置检测对不同光照强度的抗干扰能力. 首先, 根据直线电机一维刚体平移的运动特点, 设计一种基于线阵相机和非周期栅栏图像的动子位置检测系统, 线阵相机固定在动子上并跟随动子移动采集信号序列; 然后, 通过灰度线性变换图像增强算法对采集到的信号序列进行预处理以增强图像信息; 并通过 SSD 算法获取相邻信号序列间的整像素位移, 为了进一步提高测量准确性, 采用频率域矩阵乘法离散傅里叶变换对相邻信号间相关函数的峰值邻域进行上采样细化峰值曲线; 最后通过搭建动子位置检测的实验平台验证所提出方法对不同光照条件的适应性. 算法可以达到 0.01 pixels 的检测精度, 动子的实际位置检测误差在 0.025 mm 以内.

关键词: 直线电机; 线阵相机; 非接触位置检测; 灰度线性变换; 局部上采样平方差和; 亚像素

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1781

引用格式: 胡冬波, 赵吉文, 张晓虎. 基于图像增强局部上采样 SSD 的直线电机动子非接触位置检测方法 [J]. 控制与决策, 2023, 38(6): 1629-1636.

Research on non-contact position detection method of linear motor mover based on image enhanced local upsampling SSD

HU Dong-bo, ZHAO Ji-wen[†], ZHANG Xiao-hu

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A high precision subpixel detection algorithm based on image enhanced local up-sampling sum-squared difference (IE-LUSSD) is studied to improve the anti-interference ability of linear motor position detection to different light intensity. Firstly, according to the motion characteristics of one-dimensional rigid body translation of linear motor, a motion position detection system based on line-scan camera and aperiodic fence image is designed. The line-scan camera is fixed on the mover and follows mover motion to collect signal sequences. Secondly, the gray-scale linear transform image enhancement algorithm is used to preprocess the collected signal sequences to enhance the image information. Then, SSD algorithm is adopted to obtain the integer-pixel displacement between adjacent signal sequences. In order to further improve the measurement accuracy, frequency domain matrix multiplication discrete Fourier transform is applied to up-sample the peak neighborhood of the correlation function of adjacent signals to refine the peak curve. Finally, the effectiveness of the method in different light conditions is verified by building an experimental platform for motion position detection. Detection accuracy of the proposed algorithm can reach 0.01 pixels and actual position detection error of the mover is within 0.025 mm.

Keywords: linear motor; line-scan camera; noncontact position detection; gray linear transformation; local upsampling SSD; sub-pixel

0 引言

永磁同步直线电机具有结构简单、推力密度高、动态响应快等优点, 广泛应用于高精度加工设备, 如激光雕刻, 3D 打印机等^[1-2]. 产品的制造精度取决于

伺服系统的控制精度, 而动子位置的定位精度决定了伺服系统的控制精度^[3-4].

常用的直线电机动子的位置检测多采用传感器方法, 如光栅, 磁栅等. 光栅以高的检测精度和良好的

收稿日期: 2021-10-16; 录用日期: 2022-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51837001).

责任编辑: 柴利.

[†]通讯作者. E-mail: ustczjw@hfut.edu.cn.

环境适应性得到广泛应用,但是光栅的缺点主要在于制造工艺复杂,并且其应用成本与光栅的检测行程成正比^[5].磁栅会因工作环境的强磁场而产生退磁效应,影响其检测精度和使用寿命^[6].因此,研究一种低成本、抗干扰能力强的直线电机定子位置检测方法具有重要意义.

数字图像测量技术(digital image measurement technology, DIMT)近年来随着计算机技术的发展越发受到关注. DIMT以其高精度、高效率、非接触性等优点已广泛应用于不同领域中^[7-8].文献[9]利用DIMT检测高速视频序列中目标的运动,文献[10]通过建立基于成像的测量系统实现旋转轴瞬时转速的精确测量,文献[11]将视觉测量系统用于检测机床的动态轮廓误差等.

常用的图像位移检测方法有基于灰度的模板匹配算法,如归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)、绝对差和(sum of absolute difference, SAD)算法等^[12],但是只能检测出整像素位移;基于特征点的匹配算法,如加速稳健特征(speeded up robust features, SURF)、尺度不变特征变换(scale-invariant feature transform, SIFT)等^[13].上述方法可归类为空域检测方法,该类算法不仅检测精度低,而且空域中的灰度信息容易受到噪声影响,进而影响匹配精度.基于频域中相位信息的方法有相位相关算法^[14](phase correlation algorithm, PCA)、相位差算法^[15]等,频域信息相较于空域具有更好的抗干扰能力.

将数字图像测量技术应用到直线电机定子位置检测已有一些研究.文献[16]将奇异值分解相位相关算法(singular value decomposition PCA, SVD-PCA)应用到直线电机的定子位置检测中.文献[17]提出的扩展相位相关算法(extend phase correlation algorithm, EPCA)通过对二维图像序列进行多行采样和并行运算减少了计算复杂度.但以上方法均通过面阵相机采集图像序列,其不仅价格昂贵,而且由于采集到的是二维图像,在处理二维图像信息时计算量大,实时性能差.

通过以上分析,本文采用线阵相机获取不同位置的信号序列以提高运算速度,降低设备成本,并针对线阵相机采集的信号序列受光照变化敏感问题,研究一种图像增强预处理的频率域局部上采样平方差和(image enhance-local upsampled sum of square difference, IE-LUSSD)的高精度亚像素位移检测算法.该算法首先通过线性变换法对信号序列进行预

处理以增强图像信息;然后计算相邻两帧信号序列的平方差和(sum of square difference, SSD)相关函数获取整像素位移;接着通过矩阵相乘离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)对相关函数进行局部上采样实现精确的亚像素位移测量,并对上采样邻域点进行三次样条插值处理以进一步提高检测精度;最后根据系统标定系数得到定子的实际位置.

1 直线电机位置检测平台

直线电机定子的理想运动状态是一维刚体平移,但在实际工作条件中,定子产生纵向振动难以避免,此时固定在定子上的相机会产生镜头的偏移,影响采集到的信号序列.为此,设计如图1所示的非周期栅栏条纹图像,该类图像有两个特点:

1) 水平方向上的信息具有非周期性,避免了在信号采集过程中产生信息重叠.

2) 垂直方向上灰度一致性,可以保证镜头偏移时采集到的信号与理想条件下的信号信息一致.并且,如果对整幅图像进行位移计算,则由于该图像在垂直方向上的灰度一致,会造成很多冗余计算量.本文通过采用线阵相机获取图像水平方向上的一维信息来提高算法的计算速度.

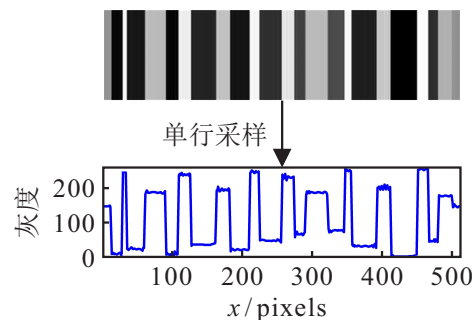


图1 非周期栅栏条纹图像及其单行采样

对于尺寸为 $N \times M$ pixels,具有 n 个条纹的非周期栅栏图像,可通过如下表达式构造:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n G_i \cdot \Gamma_i(x, y). \quad (1)$$

$$\Gamma_i(x, y) = \begin{cases} 1, & w_i - 1 \leq x \leq w_i; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

其中: G_i 为第 i 个条纹的灰度值, w_i 为第 i 个条纹的宽度.

根据直线电机定子的—维刚体平移运动特征,设计基于线阵相机和非周期栅栏条纹图像的直线电机定子位置检测平台.如图2所示,线阵相机安装在定子上并与定子保持相对静止,非周期栅栏图像固定在相机镜头前.

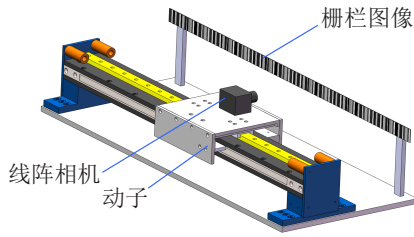


图2 直线电机定子位置检测系统

在动子运动过程中,线阵相机实时采集信号序列,通过所提出算法计算出相邻信号序列间的亚像素位移,进而结合标定系数得出动子的实际位移.数学模型如下:线阵相机采集到的相邻两帧信号序列分别为 $I_1(x)$ 和 $I_2(x)$,二者间存在如下一维刚体平移转换关系:

$$I_2(x) = I_1(x - \Delta x), \quad (3)$$

其中 Δx 为两帧信号序列间的亚像素位移,通过文中算法精确计算出 Δx 以获取动子位移.

2 基于IE-LUSSD的高精度位移检测

2.1 灰度线性变换图像增强预处理

由于线阵CCD受光照变化敏感,采集到的信号序列在弱光强下表现为图像整体较暗,灰度幅值低,导致灰度梯度和下降,图像总体信息减少.并且在文

献[18]中,通过对待求位移的两个信号序列进行泰勒级数展开证明了当信号序列的灰度梯度和降低时,检测精度也会随之降低,所以需要采集到的信号序列进行预处理以提高检测精度和对光照的抗干扰能力.

基于灰度线性变换法的图像增强方法计算简单,不会给算法的计算耗时增加过多的负担,所以将其引入到信号序列的预处理过程.设采集到的信号序列为 $I(x)$,则经灰度线性变换增强后的信号序列 $I_e(x)$ 为

$$I_e(x) = \frac{n - m}{b - a} [I(x) - a] + m, \quad (4)$$

其中 $[a, b]$ 和 $[m, n]$ 分别为 $I(x)$ 和变换后 $I_e(x)$ 的灰度范围, $[m, n]$ 取灰度范围的最大范围,即 $[0, 255]$.

图3(a)、图3(b)分别为参考信号序列和低光照强度下信号序列的二维投影和灰度分布图.可以看出,在低光照强度下信号序列的灰度值普遍较低,并且由表1可知,对于同一目标图像,在低光照强度条件下采集到的信号序列的灰度梯度和明显降低.图3(c)、图3(d)分别为通过直方图均衡化和线性变换法对图3(b)中图像增强后的信号序列,直方图均衡化图像增强后较参考信号有较大失真,而线性变换法则较好地保留了信号的灰度变化特征.

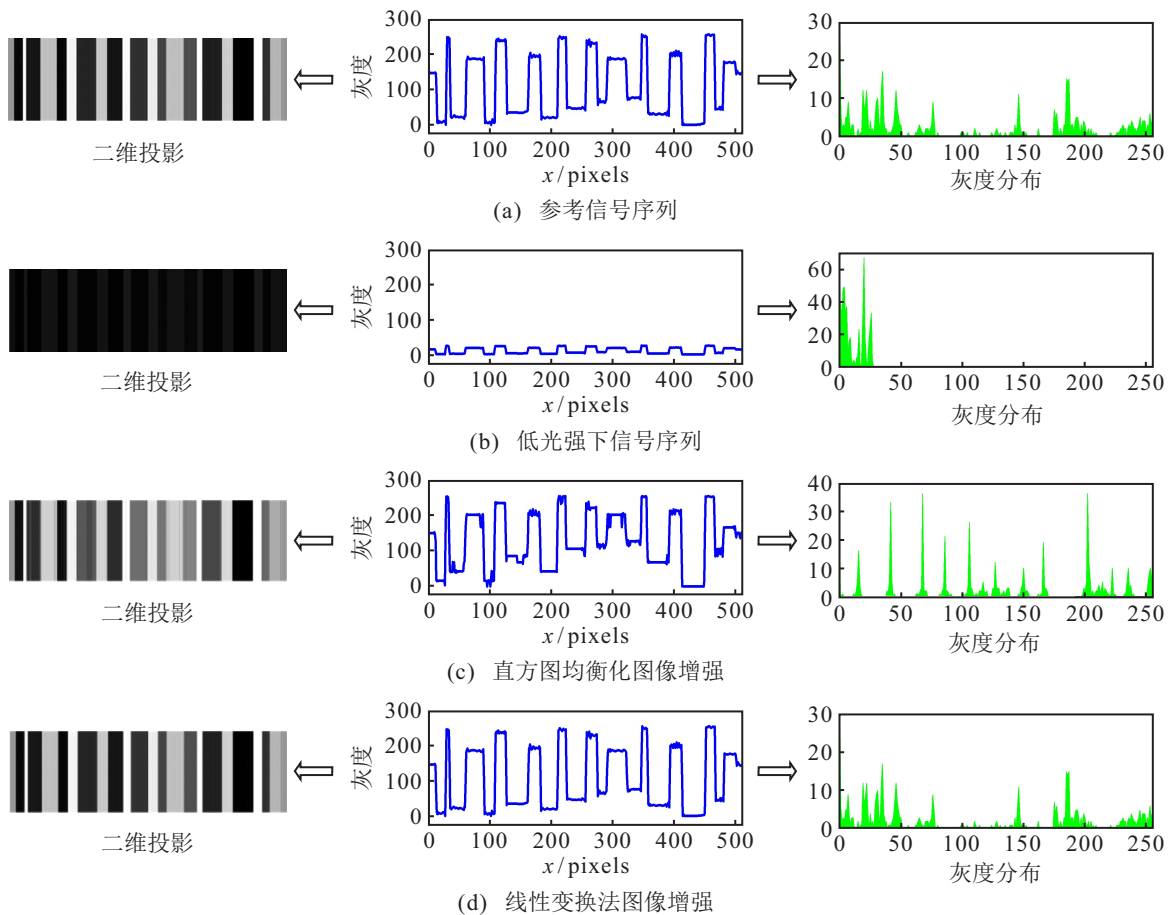


图3 一维信号序列及其二维投影和灰度分布

表1 归一化灰度梯度和

| 归一化灰度梯度和 | |
|------------|--------|
| 参考信号序列 | 18.084 |
| 低光强下信号序列 | 1.803 |
| 直方图均衡化图像增强 | 16.438 |
| 线性变换法图像增强 | 18.085 |

2.2 空域SSD

传统的SSD是一种空域灰度匹配算法^[19],通过计算两幅图像的平方差和得出两者间的像素位移.SSD函数 $C(u, v)$ 公式可表达为

$$C(u, v) = 1 - \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^M [I_2(x, y) - I_1(x + u, y + v)]^2}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^M [I_1(x, y)]^2} \quad (5)$$

如图4所示,通过搜索 $C(u, v)$ 最大峰对应的坐标即可得出整像素位移.对于一维图像,两个相邻信号序列之间的一维SSD函数可表示为

$$C(u) = 1 - \frac{\sum_{x=u}^{u+M-1} [I_2(x - u + 1) - I_1(x)]^2}{\sum_{x=1}^M [I_2(x)]^2} \quad (6)$$

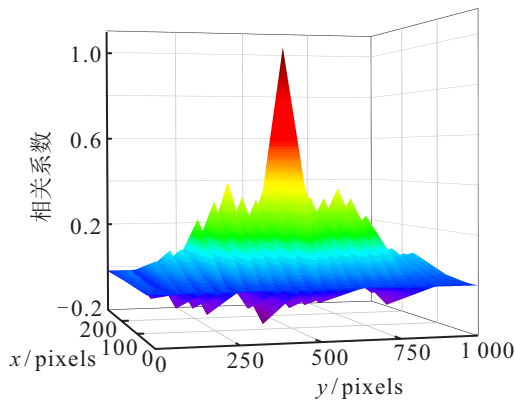


图4 二维SSD相关曲面

表2 不同位移量的SSD检测结果

| | 位移量 (pixels) | 检测结果 (pixels) |
|---------|-----------------|------------------|
| 整像素位移检测 | 2 | 2 |
| | 5 | 5 |
| | 10 | 10 |
| 亚像素位移检测 | 2.164 | 2 |
| | 5.216 | 5 |
| | 10.739 | 11 |

表2为不同位移量的SSD检测结果.由表2可知,对于亚像素位移量,SSD算法只能计算出图像间的整像素位移,而对于直线电机动子的高精度位置检测,往往需要更高精度的亚像素位移获取.

2.3 基于频域局部上采样的动子位置精确检测

为了提高SSD算法的检测精度,使其达到亚像素定位级别,引入矩阵乘法离散傅里叶变换对SSD相关函数的峰值邻域在频率域中进行局部上采样,细化峰值曲线,进而提高检测精度.对于相关函数 $C(u)$,其DFT结果为

$$Q(k) = \text{DFT}[C(u)] = \sum_{u=0}^{N-1} C(u) \exp\left(-j2\pi \frac{uk}{N}\right) \quad (7)$$

式(7)采用矩阵相乘的形式可表示为

$$Q(K) = \exp\left(-j2\pi \frac{KU^T}{N}\right) C(U) \quad (8)$$

其中 $K = U = [0, 1, \dots, N - 1]^T$.

通过矩形相乘DFT对 $Q(K)$ 进行 L 倍局部上采样,则上采样互功率谱矩阵 $Q_L(K)$ ^[20]为

$$Q_L(K) = \frac{1}{NL} C(U) \times \exp\left(\frac{-j2\pi}{N} \times \frac{KU_L^T}{L}\right) \quad (9)$$

$$K_L = [0, 1, \dots, dL - 1]^T - dL/2 + \Delta x_{SSD} L \quad (10)$$

$$U_L = [0, 1, \dots, N - 1]^T - N/2 \quad (11)$$

其中: Δx_{SSD} 为SSD函数的峰值点坐标; d 为上采样邻域窗,在保证上采样后的细化峰值点在邻域内的前提下,为减少计算量本文取 $d = 1.1$; L 为采样倍数,可取 $L = 100$ 以实现0.01 pixels的测量精度.

如图5所示,通过搜索上采样相关函数 $\rho_L(U)$ 的峰值坐标可以得到精度为 $1/L$ 像素的位移 Δx_{L1} . $\rho_L(U)$ 为 $Q_L(K)$ 的傅里叶逆变换矩阵,有

$$\rho_L(U) = \text{IDFT}\{Q_L(K)\} \quad (12)$$

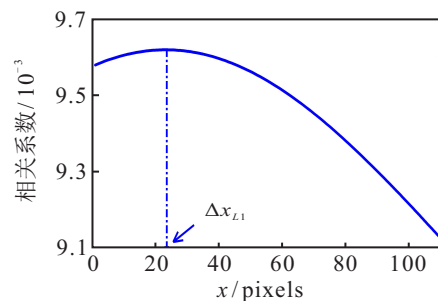


图5 上采样SSD相关曲线

为进一步提高测量精度,在上采样相关函数的峰值邻域进行3次样条插值矫正上采样峰.插值矫正结果如图6所示.矫正后的峰值坐标为 Δx_{L2} ,则两帧信号序列间的最终位移估计值 $\Delta x = \Delta x_{SSD} + \Delta x_{L2}/L$.

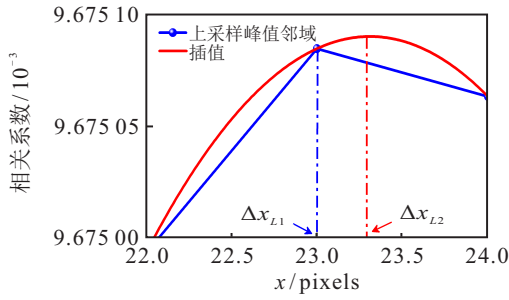


图6 上采样峰邻域插值

2.4 仿真精度验证

为了验证IE-LUSSD对低光照强度条件下的检测精度,将非周期栅栏图像分别乘以数值为0.2和0.5的光强系数,以步长为0.137 pixels移动,最终移动到20 pixels.对二维的非周期栅栏条纹图像进行单行采样模拟线阵相机的信号采集,然后通过本文算法进行位移检测.

检测误差曲线如图7所示.通过LUSSD算法,未经图像增强预处理的最大误差在光强系数为0.2和0.5时分别为0.030 pixels和0.019 pixels.而基于IE-LUSSD检测的最大误差分别为0.009 pixels和0.008 pixels.可以得出,图像增强预处理后检测精度明显提高.对误差数据进行统计分析结果见表3.可以看出,LUSSD在两种条件下的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)分别为0.014 pixels和0.008 pixels,IE-LUSSD的MAE均为0.003 pixels,并且IE-LUSSD的均方根差(root mean square error, RMSE)也小于LUSSD.上述分析表明,在低光照强度下IE-LUSSD算法的误差波动较小,分布更集中,在实现定子位置检测过程中更有优势.

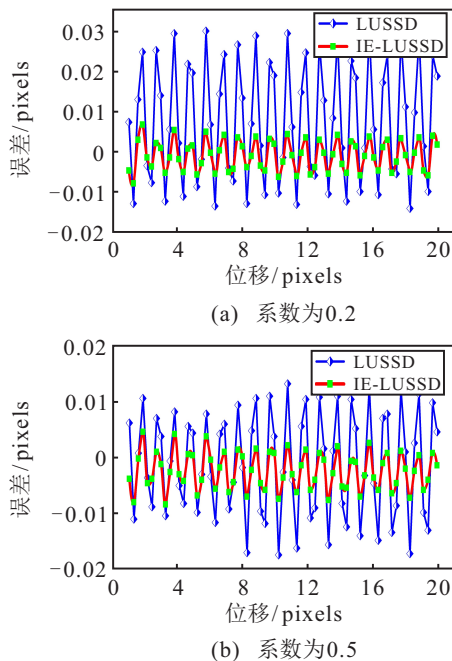


图7 图像增强前后的检测精度对比

表3 测量误差统计分析

| 光强系数 | 算法 | MAE (pixels) | RMSE (pixels) |
|------|----------|--------------|---------------|
| 0.2 | LUSSD | 0.014 | 0.016 |
| | IE-LUSSD | 0.003 | 0.004 |
| 0.5 | LUSSD | 0.008 | 0.009 |
| | IE-LUSSD | 0.003 | 0.004 |

将本文算法与SURF、SVD-PCA和EPCA亚像素检测算法进行对比以验证算法的测量准确性.如图8所示,IE-LUSSD的误差波动最小,4种算法的最大误差分别为0.040、0.029、0.018和0.009,可以得出本文算法误差分布集中,具有最高的检测精度.

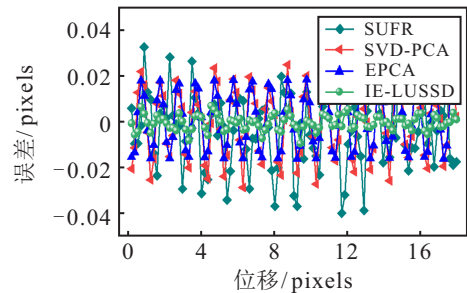


图8 不同算法的检测误差

3 实验验证

为了验证所提出方法的实用性和可行性,搭建如图9所示的永磁同步直线电机定子位置检测的实验测试平台.实验所用线阵相机的型号为LD311CB-2048D,其采样分辨率为1×2048 pixels,像素尺寸为14 μm×14 μm,最大拍摄帧率为10 kHz.电机的有效行程为350 mm,拍摄面长约400 mm,宽为35 mm,由黑白打印机打印得出,成本几乎可以忽略.补光灯在距离光源80 cm时其光照强度变化范围为3 760~28 000 Lux.动子的实际位置信息通过光栅作为参照,光栅的理论不确定度为±5 μm.

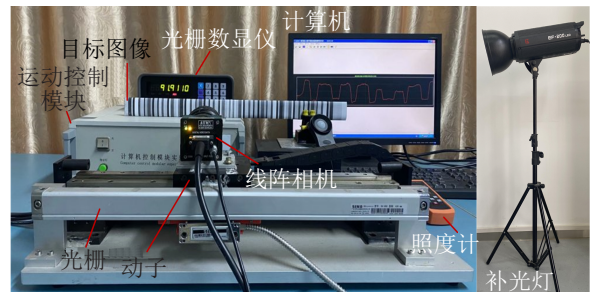


图9 定子位置检测实验平台

检测原理为:线阵相机固定在定子上并跟随定子运动,目标拍摄面放置在镜头前,在定子运动过程中实时采集相应位置的信号序列.图10所示为在12 000 Lux光照强度下采集到的两帧信号序列,信号序列间长度相同,仅存在线性平移关系.通过IE-

表4 标定系数获取

| 测试次数 | 实际位移/cm | 位移/pixels |
|------|-------------|-----------|
| 1 | 12.00~12.50 | 80.028 |
| 2 | 12.50~13.00 | 79.327 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 9 | 16.50~17.00 | 79.925 |
| 10 | 17.00~17.50 | 79.654 |

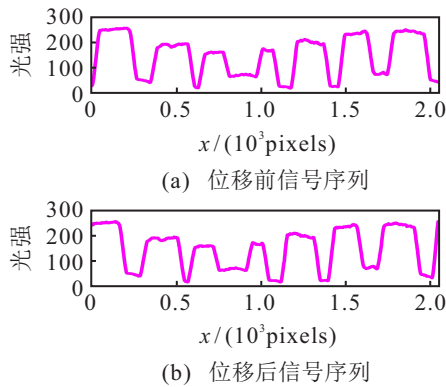


图10 位移前后采集到的信号序列

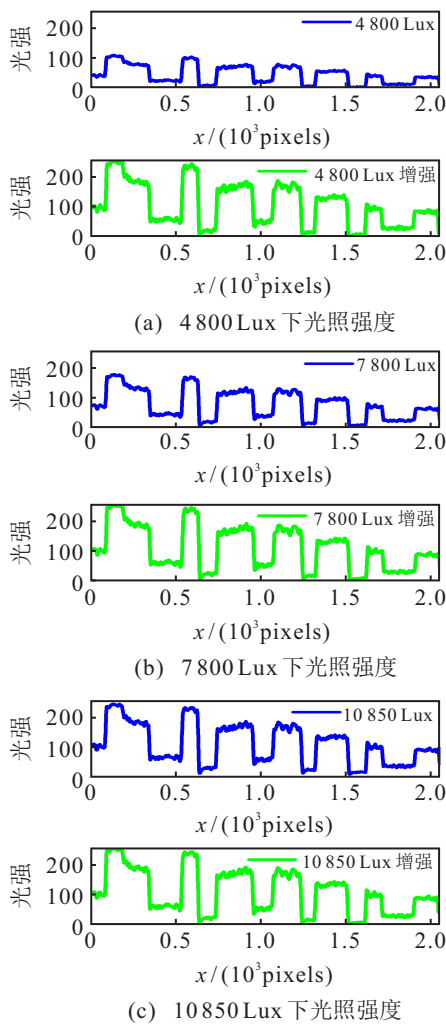


图11 不同光照条件下图像增强结果

LUSSD算法计算出相邻信号序列间的亚像素位置值,该位移值(单位: pixels)经系统标定得出动子的实际位移值(单位: mm). 将动子位移固定的距离,利用本文算法计算该段距离的亚像素位移,由表4可以得出5 mm的实际距离约等于79.365 pixels,所以本次实验中的标定系数为0.063.

3.1 不同光照条件实验验证

为了验证IE-LUSSD算法在不同光照条件下的检测精度,实验中通过补光灯改变光照强度,线阵相机在4800、7800、10850 Lux三种光照条件下采集的信号序列如图11所示. 信号序列的波动特征几乎一致,但其强度幅值与光照强度具有一定的正相关性,通过灰度线性变换图像增强后的信号序列在不失真的条件下较好地增强了图像信息. 将动子运动不同的位移,然后分别通过LUSSD和IE-LUSSD计算相邻信号序列间的亚像素位移值,结合标定系数得出动子的实际位移,并将检测结果与光栅作对比.

检测误差曲线如图12所示. 在4800Lux下,LUSSD和IE-LUSSD的误差波动分别为-0.053~0.056 mm和-0.023~0.021 mm,根据表5可知,图像

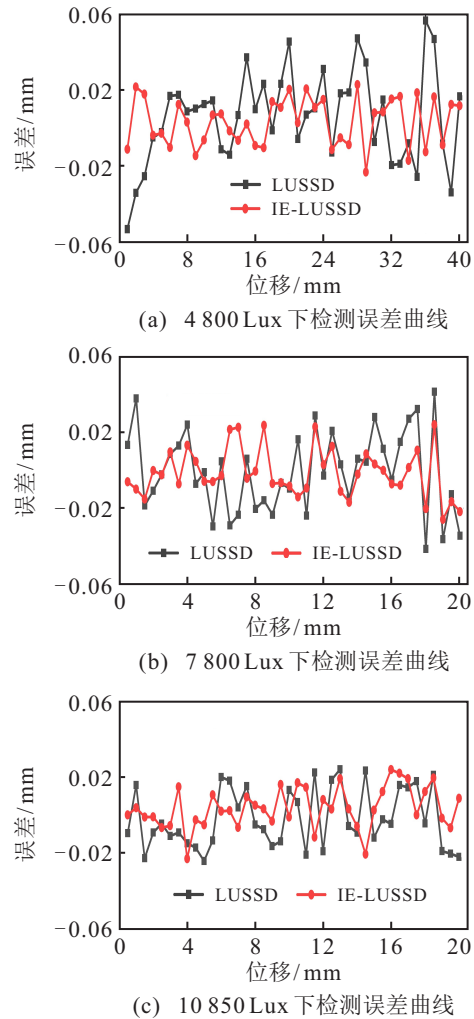


图12 不同光照条件下的检测误差

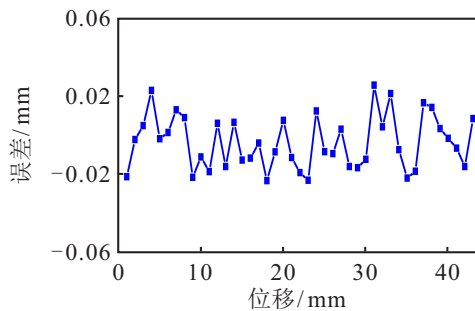
增强前后的MAE分别为0.025 mm和0.013 mm, RMSE分别为0.020 mm和0.012 mm, 由实验结果可以得出, 在低光照强度下, 经图像增强后的检测精度有较大提升. 而在10 850 Lux的高光照强度下, 由于图像增强的幅度很小, 二者的检测精度非常接近. 在不同光照强度下, 图像增强预处理后的测量误差均在0.024 mm以内, 验证了所提出方法对不同光照条件的适应能力.

表5 不同光照下的误差统计

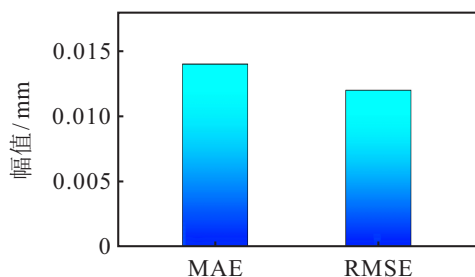
| 光照强度 (Lux) | 算法 | MAE (mm) | RMSE (mm) |
|---------------|----------|-------------|--------------|
| 4 800 | LUSSD | 0.025 | 0.020 |
| | IE-LUSSD | 0.013 | 0.012 |
| 7 800 | LUSSD | 0.021 | 0.018 |
| | IE-LUSSD | 0.013 | 0.010 |
| 10 850 | LUSSD | 0.014 | 0.012 |
| | IE-LUSSD | 0.012 | 0.011 |

3.2 动态光照条件抗干扰实验验证

在实际工作环境下, 光源会由于老化等原因发生自闪现象, 为了进一步验证所提出算法在光照强度动态变化时定子位置的检测精度, 在图像采集过程中通过补光灯动态改变光照强度, 然后通过IE-LUSSD算法检测定子的位移. 如图13所示, 上述条件下定子位置检测误差波动范围为-0.023~0.025 mm, MAE和RMSE分别为0.014 mm和0.012 mm.



(a) 位置检测误差曲线



(b) 误差统计柱状图

图13 光照条件动态变化时检测精度

通过实验分析可知, 所提出算法在光强动态变化条件下仍可以保持较高的检测精度, 对光照强度变化具有一定的抗干扰能力.

4 结论

本文针对基于线阵相机的直线电机定子位置检测中环境光照强度对检测精度的影响, 研究了一种基于IE-LUSSD的高精度亚像素算法. 该算法首先对采集到的信号序列进行灰度增强预处理, 以提高其对光照变化的抗干扰能力; 然后在频率域中对SSD函数进行局部上采样, 在提高测量精度的同时保证了抗干扰能力, 1.1倍的邻域采样窗口相较于全局采样极大地降低了计算复杂度. 搭建实验检测平台以实现在不同光照强度下定子的高精度位置检测, 测量精度可以达到0.02 mm.

参考文献(References)

- [1] 汪伟涛, 赵吉文, 宋俊材, 等. 双层反向倾斜线圈永磁同步直线电机的设计与优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 980-989.
(Wang W T, Zhao J W, Song J C, et al. Design and optimization of double layer reverse dip coil permanent magnet synchronous linear motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 980-989.)
- [2] Song F Z, Liu Y, Xu J X, et al. Iterative learning identification and compensation of space-periodic disturbance in PMLSM systems with time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7579-7589.
- [3] Luu P T, Lee J Y, Kim J W, et al. Magnetic sensor design for a permanent magnet linear motor considering edge-effect[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5768-5777.
- [4] 曹伟, 乔金杰, 孙明. 永磁直线电机扰动估计与补偿的位置反步控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1409-1414.
(Cao W, Qiao J J, Sun M. Backstepping control of disturbance estimation and compensation for permanent magnet linear motor[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1409-1414.)
- [5] Li S M, Wang J K, Zhang W T, et al. Real-time direction judgment system of sub-nanometer scale grating ruler[J]. IEEE Access, 2021, 9: 74939-74948.
- [6] 李赛, 郭彦青, 段志强, 等. 基于MAXWELL的磁栅传感器磁场仿真分析[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(4): 8-11.
(Li S, Guo Y Q, Duan Z Q, et al. Magnetic field simulation and analysis of magnetic grating sensor based on MAXWELL[J]. Transducer and Microsystem

- Technologies, 2019, 38(4): 8-11.)
- [7] 郭戈, 王兴凯, 徐慧朴. 基于声呐图像的水下目标检测、识别与跟踪研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 906-922.
(Guo G, Wang X K, Xu H P. Review on underwater target detection, recognition and tracking based on sonar image[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 906-922.)
- [8] Cheng P, Menq C H. Real-time continuous image registration enabling ultraprecise 2-D motion tracking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(5): 2081-2090.
- [9] Zhang D S, Hou W H, Guo J, et al. Efficient subpixel image registration algorithm for high precision visual vibrometry[J]. Measurement, 2021, 173: 108538.
- [10] 刘巍, 严洪悦, 李肖, 等. 机床动态检测中的高速图像运动去模糊还原[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 224-232.
(Liu W, Yan H Y, Li X, et al. High-speed motion deblurring restoration on CNC dynamic measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 224-232.)
- [11] Wang T Y, Yan Y, Wang L J, et al. Instantaneous rotational speed measurement using image correlation and periodicity determination algorithms[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2924-2937.
- [12] 韩冰, 牟忠锋, 乐小峰, 等. 归一化互相关中计算基准子图能量的快速递推[J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2565-2574.
(Han B, Mu Z F, Yue X F, et al. Fast recurrence algorithm for computing sub-Image energy using normalized cross correlation[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(10): 2565-2574.)
- [13] 宋海涛, 何文浩, 原魁. 一种基于 SIFT 特征的机器人环境感知双目立体视觉系统[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1545-1552.
(Song H T, He W H, Yuan K. A stereo vision system based on SIFT feature for robot environment perception[J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1545-1552.)
- [14] 李方彪, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于超分辨率重建的亚像素图像配准[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 477-484.
(Li F B, He X, Wei Z H, et al. Sub-pixel image registration based on super resolution reconstruction[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 477-484.)
- [15] Choi U G, Kim H Y, Han S T, et al. Measurement method of amplitude ratios and phase differences based on power detection among multiple ports[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(12): 4615-4617.
- [16] 王辉, 赵静, 赵吉文, 等. 基于 SVD 的直线电机动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.)
- [17] Wang H, Zhao J, Zhao J W, et al. A new rapid-precision position measurement method for a linear motor mover based on a 1-D EPCA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7485-7494.
- [18] Zhao J, Zhou Y, Zhao J W, et al. Mover position detection for PMSLM based on line-scanning fence pattern and subpixel polynomial fitting algorithm[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(1): 44-54.
- [19] Po L M, Guo K. Transform-domain fast sum of the squared difference computation for H.264/AVC rate-distortion optimization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(6): 765-773.
- [20] 申二华, 范大昭, 戴海涛, 等. 频域局部上采样的小基高比影像匹配方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(2): 123-127.
(Shen E H, Fan D Z, Dai H T, et al. Small baseline stereo matching method based on local up sampling in frequency domain[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(2): 123-127.)

作者简介

胡冬波(1997—), 男, 硕士生, 从事直线电机位置检测、数字图像处理的研究, E-mail: hudongbo@mail.hfut.edu.cn;

赵吉文(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电机设计与控制、光电检测等研究, E-mail: ustczjw@hfut.edu.cn;

张晓虎(1997—), 男, 硕士生, 从事直线电机参数辨识的研究, E-mail: hfutzxh@mail.hfut.edu.cn.