

基于自调整测量基准图的直线电机定子位置测量 累积误差消减

赵静, 朱龙, 吴震宇, 董菲*

安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601

摘要 为解决直线电机定子位置测量中多帧图像位移叠加而产生的误差累积问题, 提出一种加阈值变换基准图 (TTBM) 的机器视觉累积误差消减算法。首先, 根据直线电机定子的一维刚体平动特点, 生成并优选灰度变化更加平滑的一维散斑图像作为目标拍摄图。其次, 采用相位相关算法 (PCA) 改进灰度梯度方法, 对配准图像进行整像素平移后再计算亚像素位移, 以增大基准图像与配准图像之间的位移测量范围。最后, 提出自调整基准图方法, 根据图像位移的测量范围设定基准图像变换阈值, 降低位移叠加次数, 减小累积误差, 实现直线电机长行程精密位移测量。同时, 研究了基准图像变换阈值对测量精度的影响, 给出了基准图变换的最佳阈值选取范围。仿真和实验表明, 所提方法可以有效地减小直线电机定子测量中叠加而产生的累积误差。

关键词 直线电机; 精密位移测量; 阈值设置; 变基准图
中图分类号 TH82 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS222181

1 引言

永磁同步直线电机 (PMSLM) 具有构造简单、运行稳定、行程较大等优点^[1-2], 广泛应用于长行程高精度制造系统中, 如光刻机、3D 打印机与数控机床等^[3-4]。在这些应用中, 电机伺服控制精度决定了产品制造的加工精度, 而电机定子位置测量值作为电机反馈控制的重要信号决定了直线电机伺服系统的控制精度。因此, 研究一种高精度长行程直线电机定子位置测量算法是非常必要且具有实用意义的。

目前, 直线电机定子位置精密测量多采用激光干涉仪、磁栅和光栅式位置传感器^[5-7]。这类传感器测量行程大, 精度可达微米级, 满足了大多数器件加工精度的要求。但激光干涉仪价格昂贵且容易受到系统振动的影响, 需要在干燥、清洁的环境中工作^[8]。磁栅传感器容易受到系统及环境噪声影响, 特别是系统电流对传感器磁场的干扰^[9]。光栅式传感器有较强的抗干扰能力, 但随着测量长度的增加, 设备的制造难度和造价也会随之倍增^[10]。其次, 当工作温度发生变化时^[11], 长行程光栅的形变不能忽略, 形变会改变光栅的栅距, 降低系统测量精度。

基于机器视觉的图像位移测量方法具有非接触、高精度、低成本、低安装要求等优点^[12-14], 且其测量成

本不会随着行程的增加而增加^[15]。在直线电机位移测量领域, 图像位移测量方法的可行性得到了相应的验证, 相关方法有文献^[16]提出的基于扩展相位相关算法 (EPCA) 的测量方法、文献^[17]提出的空频域联合 (JSP) 的方法、文献^[18]提出的直接利用最小二乘线性拟合相位差求斜率来获取亚像素位移 (LUMLS) 的方法。但这些研究仅侧重于图像相邻帧位移测量方法, 没有关注直线电机位移测量中的累积误差问题。而累积测量误差是影响直线电机长行程位移测量精度最主要的因素。

累积误差的形成原因主要是位移测量系统中的“增量”计算^[19]。无论是光栅位移传感器还是图像位移测量方法, 均是通过叠加相邻时刻的相对位移来获得最终长行程位移的。因此, 随着测量行程或测量分辨率的增加, 这势必给直线电机位移测量带来较大的累积误差^[20]。在累积误差消除方面, 传统的解决办法多采用先验法, 通过事先大量实验将实际测量中的误差值预先补偿到测量系统中^[21], 该方法的局限性在于, 只能在特定的系统中进行测量, 当改变测量环境后需要重新设定补偿值。文献^[22]从原理上解释了光栅传感器累积误差形成的原因, 并给出两种减小累积误差的方法。一种方法为逐点补偿, 另一种是分区补偿, 两种方法都能有效地减小累积误差, 但工作量大且光栅易

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-01-30; 录用日期: 2023-02-17; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51907001)、安徽省自然科学基金 (2208085ME143)、安徽省教育厅重点项目 (KJ2021A0009)

通信作者: *feidong@ahu.edu.cn

受环境温度影响,当温度改变后,则需重新测量误差值。在数字图像测量领域,为解决误差累积问题,文献[23]提出一种下采样图像频率方法,通过减少配准次数来减小测量误差,但该方法为了减少累加次数而舍弃了大量的中间数据,只能提供最终的位移值,没办法获得电机各位置的位移信息。因此,本文根据累积误差的成因,提出一种加阈值自调整变换基准图的累积误差消减方法。设定基准图,不同时刻的位移图像与基准图进行配准,直接获得某时刻的位移值;当配准图与基准图之间的位移超过两帧图像间最大测量位移时,设定变换阈值,动态调整基准图;根据阈值变换次数进行位移叠加,获得动子实时位置。相比相邻帧位移叠加获得长行程位移的方法,所提方法能有效减少位移叠加次数,达到累积误差消减的目的。但要实现直线电机高精位置测量,所提方法需解决的关键问题是:保证两帧图像的位移测量精度的同时扩大位移测量范围。

在两帧图像测量算法方面,灰度梯度法具有高精度、强鲁棒、快速性等特点,被应用到直线电机位移测量中^[24]。但传统梯度法测量范围较小,影响基准图变换阈值的设定,进而影响长行程位移测量的叠加次数。为扩大两帧图像位移测量范围,本文拟采用相位相关算法(PCA)^[25]快速获取两帧图像间整像素偏移量并对待配准图像进行相应距离的平移,使其与参考帧之间的位移偏差减小到 1 pixel 内;再利用灰度梯度算法在小范围内的高精度测量特性对平移后的图像进行亚像素级位移测量。

综上,本文提出一种基于图像位移测量的加阈值自调整变换基准图(TTBM)的累积误差消减方法。采用 PCA 结合梯度法扩大两帧图像间的位移测量范围,并以此作为基准图变换的阈值选择的依据,减少位移叠加次数,实现长行程直线电机精密位置测量。

2 图像测量系统的搭建

2.1 一维图像测量系统

根据数字图像相关的位移测量原理与电机的运动特点,设计了如图 1 所示的 PMSLM 动子位置测量系统。将目标拍摄图像固定于电机平台左侧挡板上,相机镜头轴线与目标图像所在平面垂直。线阵 CCD 相机固定于电机动子上,随着电机动子的运动实时获取运动图像,且由计算机对采集的图像信号进行处理,获取图像间的像素偏差并最终得到电机动子的位移值。

当电机动子正常工作时,采集到的相邻帧图像信号可表示为 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$, x 为信号像素点序号。因电机只进行一维直线运动,相邻帧信号满足的关系为

$$f_1(x) = f_2[W(x)] = f_2(x - \Delta x), \quad (1)$$

式中: $W(x)$ 为信号 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 在空间中的坐标变换; Δx 为信号之间的像素位移偏差。

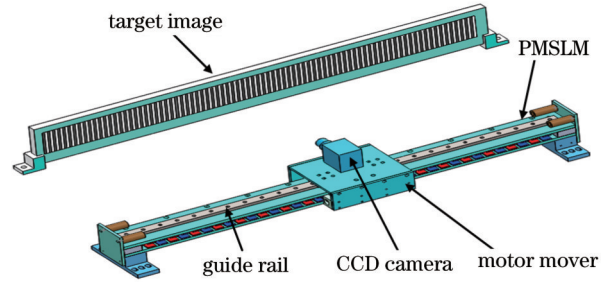


图 1 PMSLM 动子位置测量系统

Fig. 1 PMSLM mover position measuring system

2.2 目标图像的构造与优选

二维散斑图像因构造简单、鲁棒性好、采集效果好等优点多用于基于数字图像相关的位移测量中。但直线电机运动为一维运动,电机位移量只会被目标图像的横向灰度变化所影响,而与纵向灰度变化无关。因此本文将二维散斑图简化为一维散斑条纹图。一维散斑条纹图在运动方向上的灰度变化^[26]的公式为

$$I(i) = \sum_{k=1}^S \int I_0 \exp \left\{ -\frac{[x - x(i)]^2}{a^2} \right\} dx, \quad (2)$$

式中: I_0 为峰值强度; S 为散斑数; a 为散斑大小。因为目标图像的灰度在纵向无变化,即纵向灰度梯度为零:

$$G_y = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

由式(2)生成相应的散斑波形图,并对生成的散斑波形图进行二维扩展,即可获得相应的目标图像。在图像位置测量中,目标图像质量也会影响位移测量精度。由式(1)可看出,目标图像灰度分布主要受散斑个数和大小的影响。图 2 是散斑个数分别为 90、120、150,散斑大小为 3 pixel,图像规格为 600 pixel × 200 pixel 的目标图像。

为了从生成的图像中优选出在所提算法下测量精度最优的目标图像,研究了散斑个数与散斑大小对测量精度的影响。当采样间隔为 1.26 pixel、采集数量为 300 组时,不同散斑个数与散斑大小对应的平均误差曲线如图 3 所示。

由图 3 可看出:当散斑大小一定时,随着散斑个数的增加,测量精度呈逐渐增大后减小的趋势,在散斑个数为 120 个时,测量精度达到最优;当散斑个数一定时,随着散斑大小的增加,测量精度也呈先增大后减小的趋势,在散斑大小为 3 pixel 时,测量精度达到最优。综合以上实验现象,选用散斑个数为 120、半径为 3 pixel、图片尺寸为 600 pixel × 200 pixel 的一维散斑条纹图作为目标图像。

3 加阈值变基准图的累积误差消减

3.1 累积误差消减方法基本原理

对于传统的增量传感器,长行程位移的测量过程

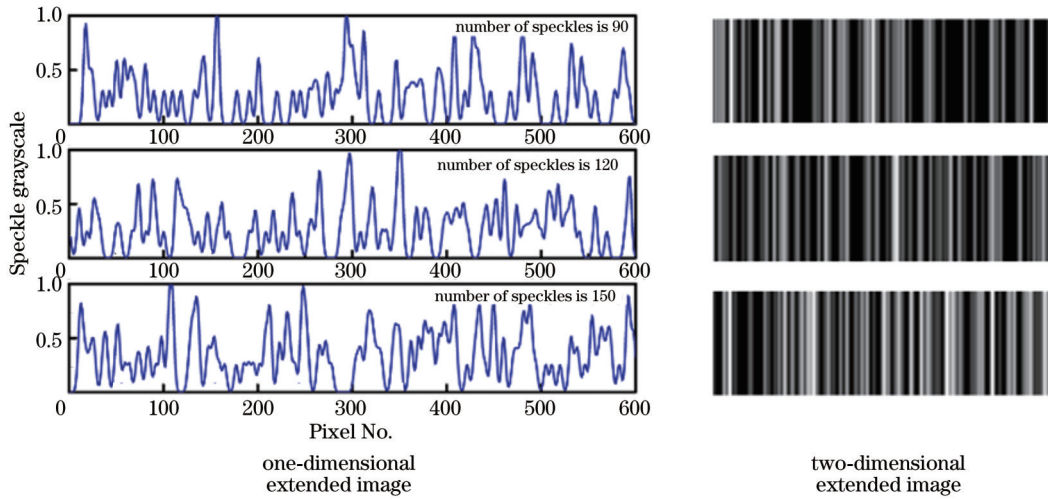


图 2 三种目标图像

Fig. 2 Three target images

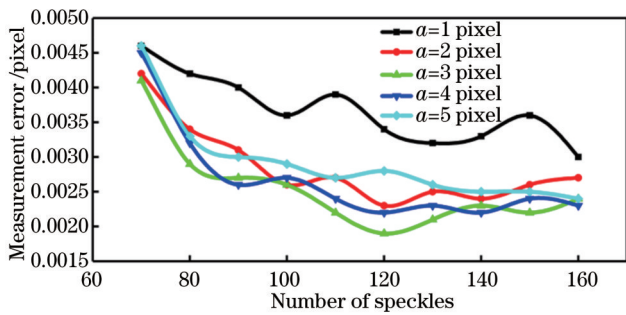


图 3 不同类型图的误差对比

Fig. 3 Error comparison of different types of graphs

如图 4 所示。

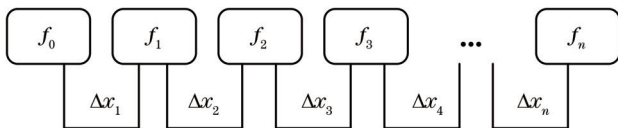


图 4 传统的增量传感器的长行程位移测量示意图

Fig. 4 Schematic of traditional incremental sensors for long travel displacement measurement

$$S(n) = \sum_{i=0}^n \Delta x_i \quad (4)$$

由式(4)可以看出,电机行程越长,或测量分辨率越高,所需的叠加次数就越多,累积误差就会越大。为减少位移叠加次数,本文提出了一种加阈值变基准图的累积误差消减方法,其原理如图 5(a)所示。 $\Delta S_{1,1}, \Delta S_{1,2}, \dots, \Delta S_{2,1}, \Delta S_{2,2}, \dots$ 分别为不同时刻配准图与其所对应基准图之间的相对位移。则第 n 帧图像所对应的最终位移 S_n 可表示为

$$S_n = \Delta S_{1, k-1} + \Delta S_{2, k-1} + \Delta S_{3, k-1} + \dots \quad (5)$$

由式(5)可见,最终位移值叠加次数为阈值变换的次数,大大减少了叠加次数,从而达到了累积误差消减的目的。

所提方法的具体流程如图 5(b)所示。设定初始图像为基准图,利用相邻帧图像的最大测量范围设定基准图变换阈值,判断相邻帧测量位移值与阈值的大小。若测量位移小于阈值,则基准图不变,继续与下一时刻图像信号帧进行位移计算;若测量位移大于阈值,保存当前位移值并将此刻图像变为基准图,与下帧图像进行位移计算,并继续判断与阈值的大小关系,直至获得最终的电机动子位移值。由图 5 可知,要减少位移叠加次数消减累积误差,需在保证图像测量精度的同时,尽可能地扩大两帧图像间的位移测量范围。

3.2 PCA 改进灰度梯度算法扩大图像位移测量范围

采用 PCA 联合灰度梯度算法以扩大相邻图像间的位移测量范围。相邻帧图像的位移可分为整像素部分加亚像素部分,则线阵 CCD 相机获取的相邻帧数字信号可进一步改为

$$f_{t+\Delta t}(x) = f_t(x + v + \Delta x), \quad (6)$$

式中: v 为 x 方向上的整像素位移; Δx 为相应的亚像素位移;信号大小为 $1 \times N$, N 为采集图像的大小(采集一维图像长度,以像素为单位)。因此,对于整像素部分(v),采用基于快速傅里叶变换的 PCA 得到傅氏互功率谱。根据傅里叶变换的平移特性,则式(6)可以表达为

$$F_{t+\Delta t}(u) = F_t \exp\{2\pi j\{u[d(v + \Delta x)]\}\}, \quad (7)$$

$$F_t(u) = F[f_t(x)] = \sum_{x=0}^{N-1} f_t(x) \exp\left(-2\pi j \frac{ux}{N}\right), \quad (8)$$

$$F_{t+\Delta t}(u) = F[f_{t+\Delta t}(x)] = \sum_{x=0}^{N-1} f_{t+\Delta t}(x) \times \exp\left(-2\pi j \frac{ux}{N}\right), \quad (9)$$

式中: $F_{t+\Delta t}(u)$ 和 $F_t(u)$ 分别为 $f_{t+\Delta t}(x)$ 和 $f_t(x)$ 的傅里叶变换。则相邻帧图像位移前后的归一化互功率谱为

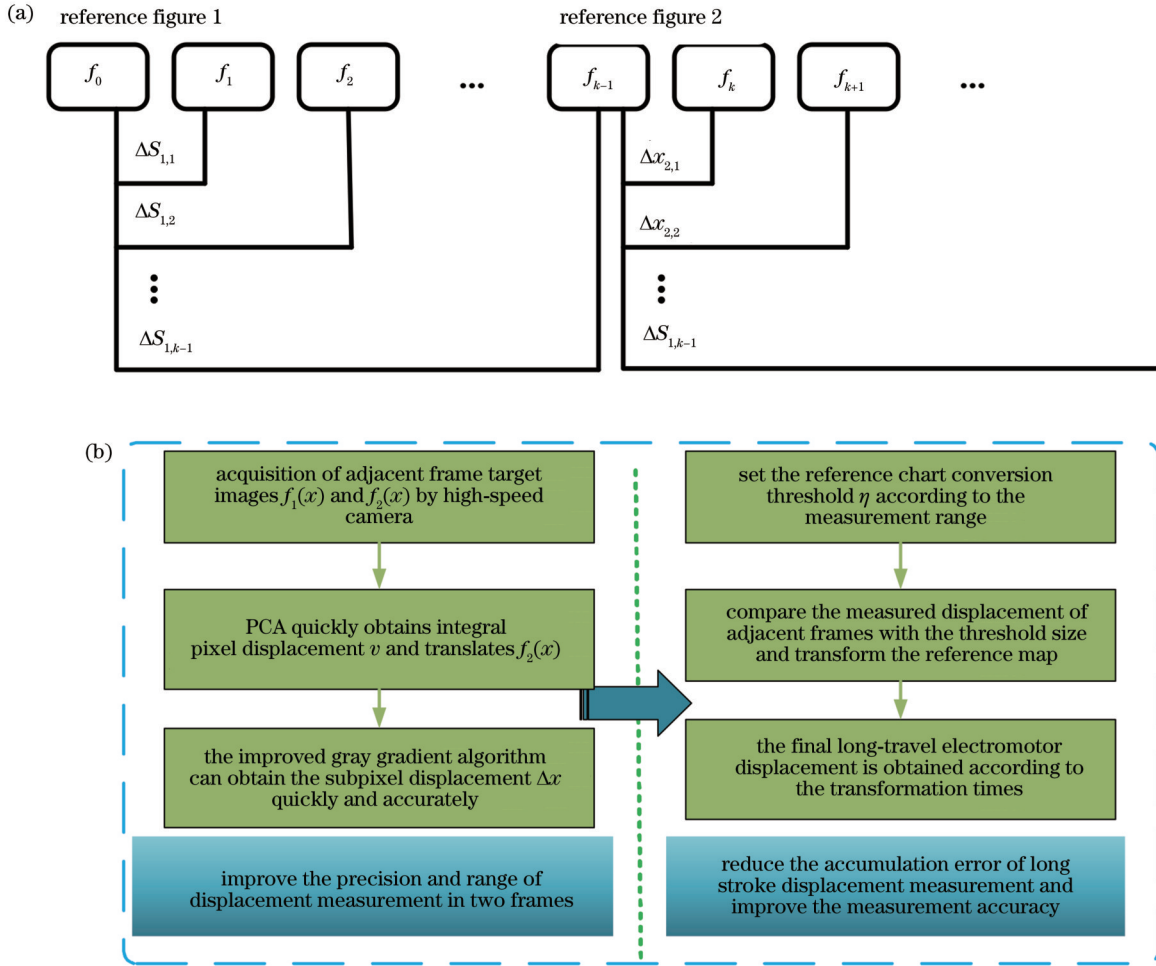


图 5 所提累计误差消减方法。(a)原理图;(b)流程图

Fig. 5 Schematic of the proposed cumulative error reduction method. (a) Schematic diagram; (b) flow chart

$$Q(u) = \frac{F_t(u)F_{t+\Delta t}^*(u)}{|F_t^*(u)F_{t+\Delta t}(u)|} = \exp\left\{2\pi j\left\{u\left[d(v + \Delta x)\right]\right\}\right\}, \quad (10)$$

式中: *表示共轭。进而通过傅里叶逆变换获得一维单位脉冲函数:

$$\delta(x + v + \Delta x) = F^{-1}\left\{\exp[2\pi j(u\Delta x)]\right\}, \quad (11)$$

单位脉冲函数峰值坐标表示相邻帧图像序列的整像素偏移量 v 。

其次,对于亚像素部分(Δx),对式(6)进行一阶泰勒展开,并舍弃高价无穷小量,得到

$$f_i(x + v + \Delta x) = f_i(x + v) + \Delta x g_x(x + v), \quad (12)$$

式中: $g(x)$ 为信号灰度一阶梯度。为了提高测量精度和减少计算时间,采用计算结果准确、性能稳定的 Barron 算子来计算 $g(x)$:

$$g_x = \frac{1}{12} f_{t+\Delta t}(x-2) - \frac{8}{12} f_{t+\Delta t}(x-1) + \frac{8}{12} f_{t+\Delta t}(x+1) - \frac{1}{12} f_{t+\Delta t}(x+2), \quad (13)$$

则目标函数可定义为

$$C(\Delta x) = \sum_{t=0}^N [f_{t+\Delta t}(x) - f_t(x + v + \Delta x)]^2. \quad (14)$$

式(14)的极值点对应的 Δx 即为亚像素位移值。由式(12)和式(13)求式(14)的极值点,则 Δx 满足的关系为

$$\Delta x = \left(\sum g_x^2\right)^{-1} \times \sum (v \times g_x), \quad (15)$$

由此可得到相邻帧间亚像素级位移量 L :

$$L = v + \Delta x. \quad (16)$$

为了验证所提改进算法在位移测量范围上的优越性,采用傅氏变换方法对 $1 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 仿真图像进行不同间隔平移,并统计不同间隔的测量误差,绘制如图 6 所示的误差曲线。图 6(a) 为传统梯度算法在不同图像位移偏差下的测量误差,横坐标为采用传统梯度算法测量相邻帧的位移间隔,图 6(b) 为所提方法的不同位移图像测量误差。

由图 6(a) 可知:当位移间隔为 $0 \sim 1 \text{ pixel}$ 时,传统梯度算法有较高的测量精度;随着图像位移间隔的不断增大,该算法的测量误差不断增加,当位移间隔超过 1 pixel 后,测量误差将达到 0.01607 pixel 。这表明传统梯度算法在小范围内的测量具有高精度测量特性,

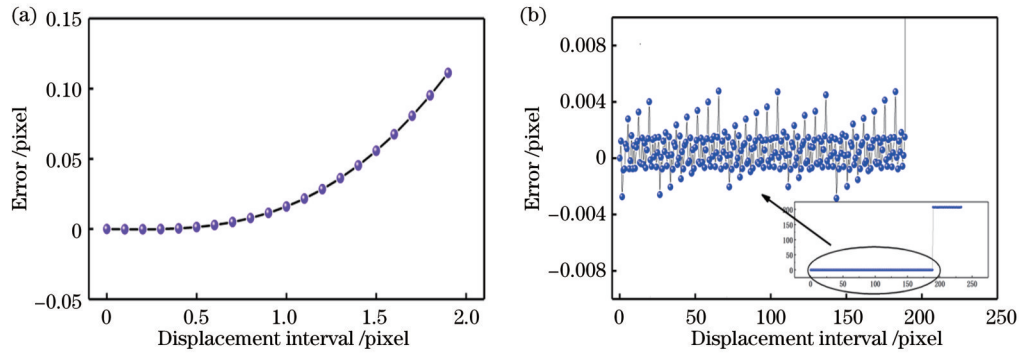


图 6 测量范围对比。(a)传统梯度算法;(b)所提方法

Fig 6 Comparison of measurement range. (a) Traditional gradient algorithm; (b) proposed method

但当测量位移范围增大后测量精度不断降低,无法再进行高精度位移测量。由图 6(b)可得,在 0~189.54 pixel 位移间隔内,所提方法的测量误差稳定在 $-0.004\sim 0.006$ pixel,满足偏移图像位置测量的精度要求。即对于相同尺寸的被测图像,经过改进后,所提算法的测量范围由 1 pixel 内扩展到了 189.54 pixel 内,为后面累积误差消减中的基准图变换阈值提供了选取

范围。

3.3 基于加阈值变基准图的累积误差消减算法

根据所提两帧图像位移测量算法的测量范围,选定合适的基准图变换阈值(η)。对得到的两帧间位移值与基准图变换阈值进行比较,若当前测量位移小于阈值,则基准图不变,若当前测量位移大于阈值,则变换基准图。则目标函数可进一步改写为

$$C'(\Delta x) = \begin{cases} \sum \sum [f_{t+b\Delta t}(x) - f_t(x+v+\Delta x)]^2, & v+\Delta x < \eta \\ \sum \sum [f_{t+b\Delta t}(x) - f_{t+(b-1)\Delta t}(x+v+\Delta x)]^2, & v+\Delta x > \eta \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $b=2, 3, 4, \dots, M-1$; f_t 和 $f_{t+(b-1)\Delta t}$ 分别为原基准图和变换后基准图; M 为信号采集帧数; $f_{t+b\Delta t}(x)$ 为第 $b+1$ 帧图像信号。改写后的目标图像再经过式(10)和式(11)可计算得到变换后的亚像素位移值 L_b :

$$L_b = \begin{cases} v_b + \Delta x_b, & v_b + \Delta x_b < \eta \\ v + v_b + \Delta x + \Delta x_b, & v_b + \Delta x_b > \eta \end{cases}. \quad (18)$$

经过不断循环直至最后一帧测量结束后,可得最终的直线电机动子的长行程位移值 S :

$$S = v + v_1 + v_2 + \dots + v_b + \Delta x + \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_j, \quad (19)$$

式中: j 为基准图替换次数。为了验证所提方法的测量精度,对相邻帧间隔为 0.78 pixel、帧数为 300 的采集图像进行测量。基准图变换阈值为 100 pixel,所提算法与传统梯度算法的测量精度和误差分析如图 7 所示。

图 7(a)显示了所提方法与传统梯度算法对电机动子位移跟踪的效果。当采集图像达到 300 帧时,所提方法仍能很好进行跟踪,而传统梯度算法跟踪效果不断下降,逐渐偏离真实电机位移。由图 7(b)的累积误差对比可以进一步验证这一结果。图 7(b)中随着采集图像帧数的增加,传统算法误差不断累积且波动范围较大,而所提方法累积误差远小于传统算法且变化平缓。结合图(c)最大累积误差和平均累积误差对比可得:传统梯度算法的最大累积误差达到了

0.12246 pixel,而所提变基准图算法的最大累积误差只有 0.014 pixel;传统梯度算法的平均累积误差为 0.0551 pixel,而所提变基准图算法的平均累积误差仅为 0.00582 pixel。由此,与传统梯度算法相比,所提变基准图累积误差消减算法减小了多帧图像测量中的误差,提高了电机动子位移测量的精度。

3.4 基准图变换阈值大小对测量精度的影响

由方法原理图 5 可以看出,基准图变换阈值的选择直接影响直线电机长行程位移的测量精度,因为不同大小的基准图阈值会改变叠加的次数。因此,需要进一步讨论阈值大小对长行程位移测量精度的影响。

为了研究基准图阈值对测量精度的影响,对采样间隔为 7.80 pixel、大小为 1 pixel \times 600 pixel 的 1000 帧的散斑条纹图像进行多组不同变换阈值实验。变换阈值设为从 0 pixel 到 190 pixel,则 1000 帧图像的累积测量误差如图 8 所示。

其中,阈值为 0 pixel 时,累积误差值为所有帧叠加的累积误差,阈值超过 189.54 pixel 时,累积误差值超出算法两帧最大测量距离。由图 8 可以看出:随着阈值由 0 pixel 增加到 100 pixel 时,累积误差不断减小,并最终减小到 0.0110 pixel;当阈值继续增大到 100~189.54 pixel 范围时,累积误差在 0.0091~0.0369 pixel 间达到动态平衡;当阈值超过 189.54 pixel 后,因为超出了基础的相邻帧位移测量范围,累积误差急剧

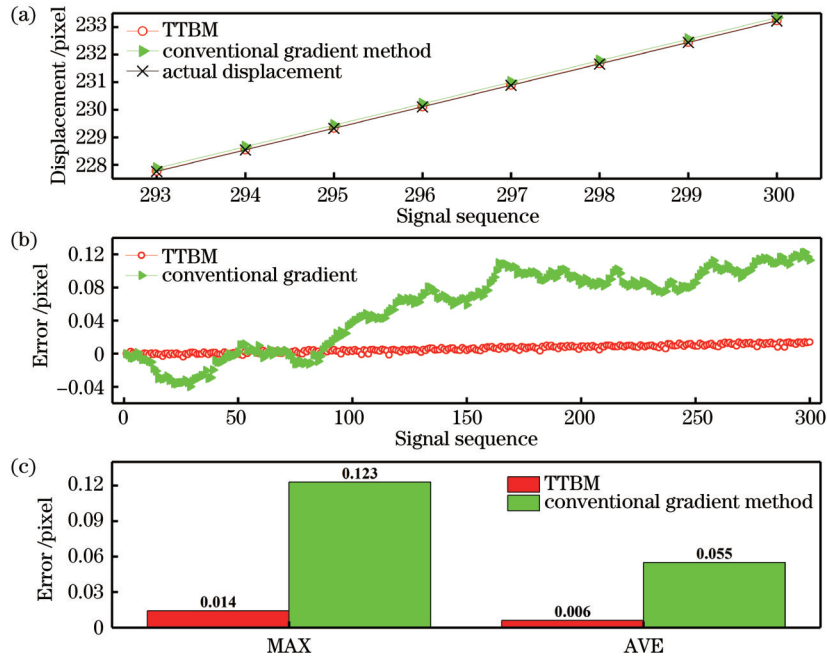


图 7 所提变基准图方法与传统方法的对比。(a)位移跟踪对比;(b)累积误差对比;(c)误差分析

Fig. 7 Comparison between the proposed variable benchmark method and the traditional method. (a) Displacement tracking comparison; (b) cumulative error comparison; (c) error analysis

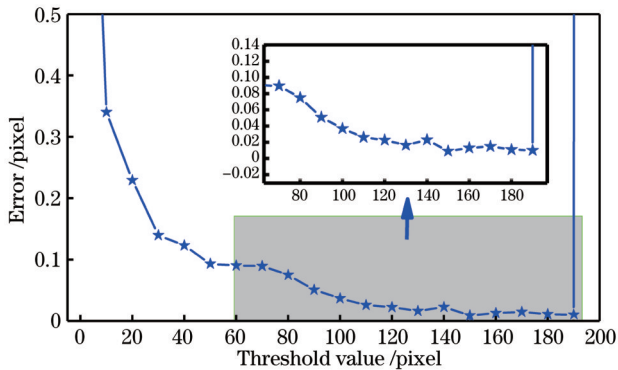


图 8 不同阈值下的累积误差

Fig. 8 Cumulative error at different thresholds

增大,无法继续测量。因此,当采集到的图像信号大小为 1 pixel×600 pixel 时,阈值应选定在 100~189.54 pixel 为最佳,此范围内累积误差最小,能够高精度地对长行程直线电机定子位移进行测量。

此外,阈值的大小还与被测图像信号的大小有关。为了研究图像大小对阈值选择的影响,对 1000 组不同大小的一维图像信号进行不同变换阈值的仿真实验。阈值范围与累积误差如表 1 所示。

表 1 显示了不同大小图像的最佳阈值取值范围区间,在此范围内累积误差可达到最小波动区间,长行程直线电机定子位移测量精度最高。由表 1 可以得到:当图像尺寸较小时,阈值选择范围较小且阈值取值偏小;当图像大小不断增大时,阈值的取值和取值范围都不断增大;当图像增大到 1 pixel×600 pixel 时,阈值选择范围达到最大,且可以取到较大数值的阈值,当图像

表 1 不同大小图像的最佳阈值取值范围

Table 1 Optimal threshold value range for images with different sizes

Image size/ (pixel×pixel)	Threshold value range/ pixel	Cumulative error range/pixel
1×200	10-27.30	0.0170-0.0430
1×300	30-51.98	0.0084-0.0391
1×400	50-87.72	0.0177-0.0476
1×500	80-150.18	0.0163-0.0353
1×600	100-189.54	0.0091-0.0369
1×700	100-153.10	0.0175-0.0378
1×800	80-134.52	0.0128-0.0384
1×900	70-114.92	0.0086-0.0402
1×1000	70-113.10	0.0105-0.0333

尺寸超过 1 pixel×600 pixel 后,阈值范围反而减小。由此,经仿真实验获得的不同尺寸图像对应的变换阈值取值范围为相机采集图像窗口截取范围提供取值范围,提高了长行程直线电机定子测量平台的灵活性,使电机定子位移测量平台具有可调节性,其累积误差消减效果最好,能更加精准地获取定子位移。

4 实验结果验证

4.1 实验测试平台

根据图像测量原理和模型,搭建了 PMSLM 的定子位置检测平台,测量平台与主要设备如图 9 所示。该平台主要包括直线电机、线阵 CCD 相机、电机控制

模块、目标图像、精密光栅、光度计与补光灯等。其中, PMSLM 运动速度最大为 1 m/s, CCD 相机最大采样频率为 5.4×10^3 frame/s, 分辨率为 1×2048 pixel。光

栅测量分辨率为 0.005 mm, 用于测量动子位移并作为实际参考值分析算法的测量值。

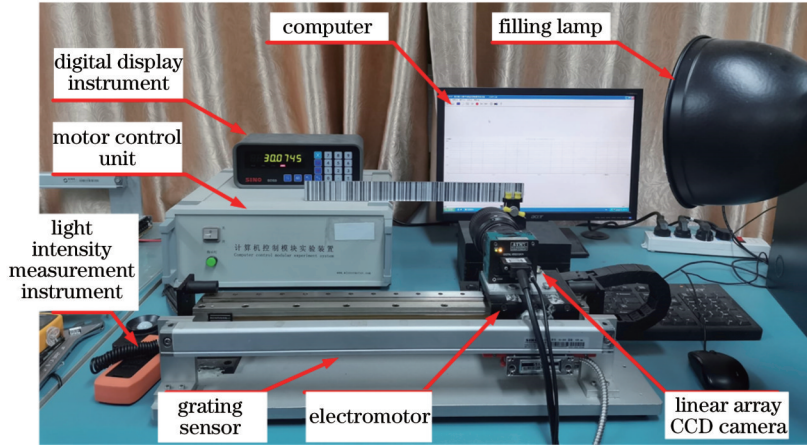


图 9 实验平台

Fig. 9 Experiment platform

为了获得实验中像素与实际动子位移的标定系数 ϵ , 采用文献[27]中的校准方法。将相机参数保持不变, 设定电机位移距离并进行等间距采样, 获取光栅位移值与相机采样数据。通过算法计算, 获取亚像素级位移值, 如表 2 所示。

表 2 测量系统标定系数计算

Table 2 Measurement system calibration coefficient calculation

Trial No.	Moving distance /cm	Displacement /pixel
1	25.0000-25.1000	22.4015
2	25.1000-25.2000	23.1301
3	25.2000-25.3000	22.9188
⋮	⋮	⋮
8	25.7000-25.8000	22.7136
9	25.8000-25.9000	22.5677

标定系数的计算公式为

$$\epsilon = \left(\sum x_i \right) / nd, \quad (20)$$

式中: x_i 为相邻帧间测量像素值; n 为测量组数; d 为预设测量间隔。由式(20)计算得, 算法测得的一个像素值对应到实际物理位移为 0.0436 mm。

4.2 所提算法测量精度验证

根据图 9 的位移测试实验平台, 进行位置跟踪累积误差分析实验, 结果如图 10 所示。电机以 0.1 m/s 匀速运动, 光栅测量值作为位移设定值。CCD 相机采样频率为 250 Hz, 截取采集到的图像信号窗口尺寸为 $1 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$, 对 300 组图像信号进行测量。根据阈值讨论分析, 基准图变换阈值取 120 pixel。

图 10(a) 展示了所提算法的相邻帧位移测量范围及基准图变换位置。其中, 相邻帧位移测量范围为电

机运行前后首尾两帧图像测量结果。选择初始时刻图像作为基准图, 随着直线电机的运行, 动子位移不断加大, 在 0~18 mm 范围内, 两帧图像位移测量结果可较准确地跟踪设定位移。当位移超过 18 mm 后, 会产生较大误差, 无法进行动子位移的高精度测量。此时需要变换基准图。图 10(b) 为所提方法与传统长行程位移测量方法的累积误差对比。可以看出: 随着位移的不断增大, 累积误差不断增大; 但传统长行程位移测量方法的累积误差波动较为剧烈, 增幅较大, 最大累积误差达 -0.27941 mm ; 所提算法增幅较小, 且产生的最大累积误差仅有一 -0.04364 mm , 远远小于传统的测量方法。因此, 通过此实验验证了所提方法在长行程电机动子位移测量中对累积误差的消减效果, 能够实现较长距离下的电机动子位移的精度测量。

4.3 不同算法长行程累积误差对比

为了进一步验证所提算法在长行程直线电机动子测量中的累积误差消减效果和测量精度上的优越性能, 将所提算法与目前已经提出的基于数字图像的测量方法 (EPCA^[10]、JSP^[11]、LUMLS^[12]) 进行对比。4 种方法的相邻帧位移测量误差、累积误差和误差数据分析如图 11 所示。图 11(a) 为不同算法的相邻帧位移测量误差, 可以发现, 相比于 EPCA、JSP 和 LUMLS 算法, 所提算法的测量误差波动范围最小, 仅为 $-0.0126 \sim 0.0097 \text{ mm}$, 验证了所提算法在相邻帧位移测量精度上的优势, 为后续的累积误差消减提供精度基础。图 11(b) 为 4 种算法的累积误差, 可以看出, EPCA、JSP 和 LUMLS 三种方法的累积误差都随着行程的增加不断增加, 最大绝对累积误差分别达 0.36603 mm 、 0.48955 mm 和 0.2372 mm , 而所提算法的累积误差波动范围最小, 最大累积误差仅为 0.04364 mm 。同时还对比分析了 4 种算法的累积位

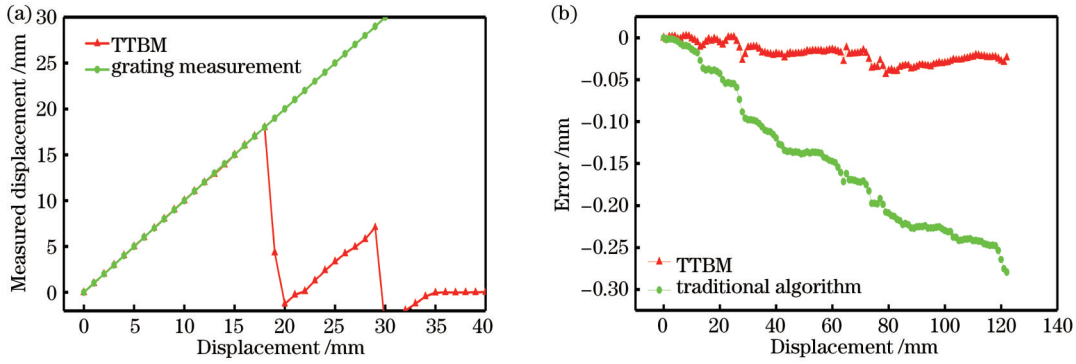


图 10 测量精度验证。(a)相邻帧测量范围验证;(b)累积误差消减

Fig. 10 Measurement accuracy verification. (a) Verification of the measurement range of adjacent frames; (b) cumulative error reduction
 移误差的平均误差,如图 11(c)所示,相比其他三种算法的平均误差(分别为 -0.08356 mm、 0.2683 mm 和 -0.07223 mm),所提算法的平均误差为

0.01917 mm。由此可见,所提算法误差最小,精度最高,相较于其他算法,更能准确地测量电机定子位移。

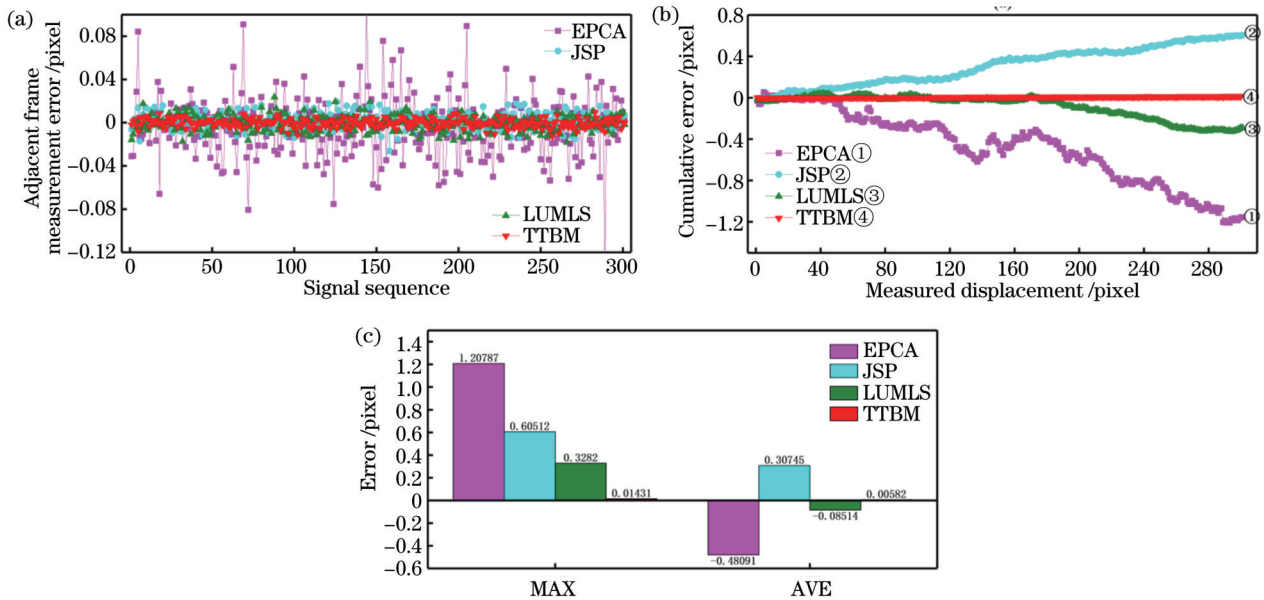


图 11 不同算法对比。(a)相邻帧位移测量误差对比;(b)累积误差对比;(c)累积误差分析

Fig. 11 Comparison of different algorithms. (a) Comparison of displacement measurement errors of adjacent frames; (b) cumulative error comparison; (c) cumulative error analysis

4.4 不同算法鲁棒性对比

累积误差的形成还与测量系统的环境有关,测量环境的光照变化和电机平台的抖动都会给图像采集带来噪声,从而影响测量系统的精度。为了验证所提算法在不同光照下的测量鲁棒性,进行了多组实验。图 12展示了不同光照下所提算法的测量误差,以及和不同算法的鲁棒性对比与分析。图 12(a)显示了所提算法在 3 种不同光照下的累积误差变化,可以得到,在 3 种不同的光照环境下,所提算法测量的累积误差分别为 0.04364 , 0.04862 , -0.03505 mm,误差随着光照强度的变化也发生变化,但总体累积误差能够稳定小于 0.05 mm。图 12(b)显示了在 3600 lx 低光照环境下,所提方法与其他三种方法的累积误差对比,其中

EPCA、LUMLS 和 JSP 算法最大误差分别达到了 0.3116 mm、 0.2212 mm 和 0.1254 mm,而所提算法的累积误差最小,仅为 0.0436 mm。且由图 12(c)可进一步发现,在 3 种不同的光照强度下,所提算法的最大误差绝对值都小于其他三种算法。因此,相比其他方法,所提算法在 3 种不同的光照环境下都具有很高的测量精度和鲁棒性。

4.5 不同算法实时性对比

对于电机定子位移测量系统,算法的实时性将会影响位置反馈效率。所提算法结构精简,运算速率高。为验证所提算法实时性好,比较分析了所提算法与其他算法的耗时,如表 3 所示,对 300 组实验耗时进行记录。

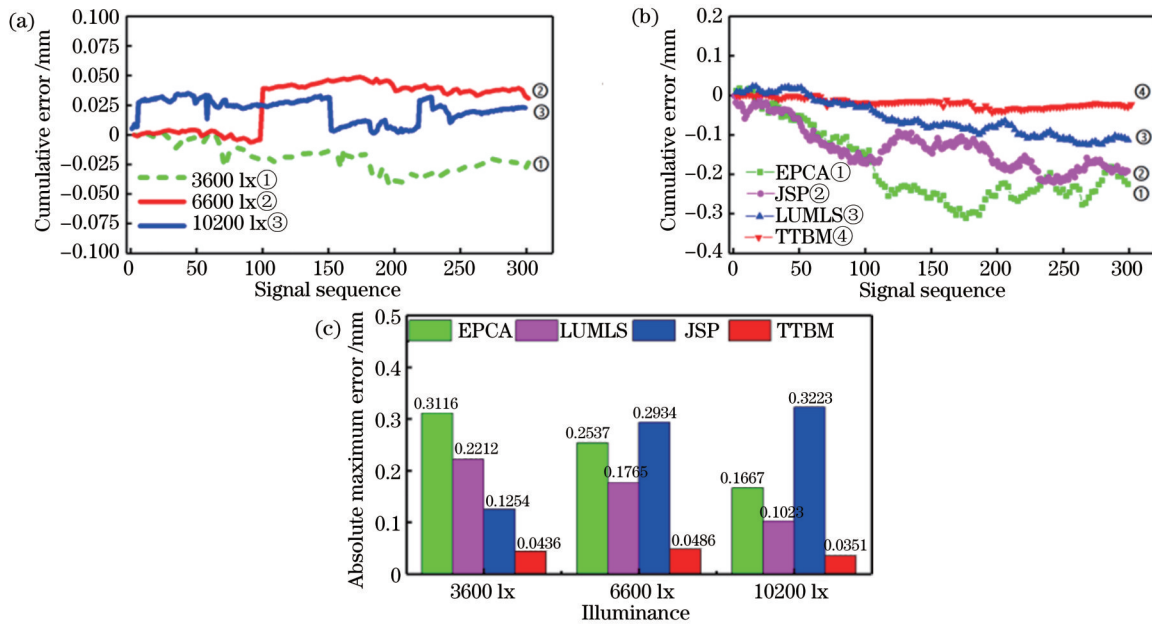


图 12 鲁棒性对比。(a)不同光照下测量误差对比;(b)低光照下不同算法误差对比;(c)误差分析

Fig. 12 Robustness comparison. (a) Comparison of measurement error under different illuminations; (b) error comparison of different algorithms under low illumination; (c) error analysis

表 3 不同算法运行耗时对比

Table 3 Time-consuming comparison of different algorithms

Algorithm	Time/s
EPCA	0.0536
JSP	0.0828
LUMLS	0.0209
TTBM	0.0125

由表 3 数据可知:所提算法耗时为 0.0125 s,仅为 EPCA 算法耗时的 23.32%;JSP 和 LUMLS 算法的耗时为 EPCA 的 1.5448 和 0.3899。因此,所提算法在实时性方面优于其他三种算法,易于实现直线电机动子位移的快速测量。

根据上述实验结果和与其他算法的对比分析,在 PMSLM 的位移测量中,所提算法具有较高的测量精度与鲁棒性,能够有效地减小在多帧位移测量中因位移叠加而产生的累积误差。因此,所提方法可用于长行程 PMSLM 的动子精确位移测量。

5 结 论

通过提高图像相邻帧测量精度和消减累积误差,实现了直线电机动子位移长行程高精度测量。首先,将图像配准分为整像素平移和亚像素高精度测量两部分,通过分步计算来提高和扩大算法在相邻帧位移图像测量中的精度和范围。然后,为了消减长行程电机动子位移测量过程中的累积误差,采用加阈值变换基准图的方法减少位移的累加次数,从而实现了累积误差的消减。通过仿真和搭建测量系统平台,验证了所提方法的可行性和有效性。实验表明,相比传统算法,

所提算法可有效减小 80% 以上的累积误差,并在不同光照下仍具有较好的累积误差消减效果。因此,所提算法能有效地减小长行程测量时的累积误差,利于实现长行程直线电机动子位移的高精密测量。

参 考 文 献

- [1] 赵静,王婉婉,周杨,等.基于变换序列权重峰值拟合的直线电机速度的快速精密测量[J].光学精密工程,2022,30(5):574-583.
Zhao J, Wang W W, Zhou Y, et al. Rapid-precision velocity measurement of a linear motor based on weighted peak fitting of the transformed sequence[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(5): 574-583.
- [2] 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.
- [3] 李兆泽,李思坤,王向朝.基于随机并行梯度下降算法的光刻机光源与掩模联合优化方法[J].光学学报,2014,34(9):0911002.
Li Z Z, Li S K, Wang X Z. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911002.
- [4] 郑立功,郝腾,国成立,等.激光直写机床系统正交性误差影响下计算全息图相位分析[J].光学学报,2016,36(10):1012005.
Zheng L G, Hao T, Guo C L, et al. Phase analysis in computer-generated holograms induced by direct laser writing systems with orthogonality error[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1012005.
- [5] Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. Laser interferometer space antenna[EB/OL]. (2017-02-02) [2022-11-12]. <https://arxiv.org/abs/1702.00786>.
- [6] Deepu Vijay M, Singh B, Bhuvanewari G. Position sensor-less synchronous reluctance generator-based grid-tied wind energy conversion system with adaptive observer control[J]. IEEE

- Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 693-702.
- [7] Hu D T, Lü S K, Guo Y X, et al. A fiber Bragg grating force sensor with a sensitization structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 3042-3048.
- [8] 张志平, 杨晓峰. 激光外差干涉技术在光刻机中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922017.
Zhang Z P, Yang X F. The application of laser heterodyne interference technology in lithography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922017.
- [9] 黄婷, 杜伟哲, 苏坤, 等. 深空探测卫星准直器跨尺度栅格结构的激光精密微焊接技术与装备[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002402.
Huang T, Du W Z, Su K, et al. Laser microwelding technology and equipment for cross-scale collimator grid of deep-space exploration satellite[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002402.
- [10] 王浩然, 董明利, 孙广开, 等. 遥感卫星结构在轨热应变光纤光栅监测方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(12): 20220202.
Wang H R, Dong M L, Sun G K, et al. Remote sensing satellite structure in-orbit thermal strain Bragg fiber grating monitoring method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(12): 20220202.
- [11] 李顶顶, 卢文科, 左锋. 光纤位移传感器温度补偿的研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(10): 78-82.
Li D D, Lu W K, Zuo F. Research on temperature compensation for an optical fiber displacement sensor[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(10): 78-82.
- [12] 张良总, 杨涛, 吴云, 等. 基于图像测量的 Stewart 平台双阶控制技术[J]. 光电工程, 2022, 49(8): 220019.
Zhang L Z, Yang T, Wu Y, et al. Image measurement-based two-stage control of the Stewart platform[J]. Opto-Electronic Engineering, 2022, 49(8): 220019.
- [13] 郑星, 黄海莹, 毛勇建, 等. 基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(18): 2187-2194.
Zheng X, Huang H Y, Mao Y J, et al. Research on image measurement of explosion shock waves based on high-speed schlieren technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(18): 2187-2194.
- [14] 娄群, 吕钧瀚, 文立华, 等. 基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 2012002.
Lou Q, Lü J H, Wen L H, et al. High-precision camera calibration method based on sub-pixel edge detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(20): 2012002.
- [15] 叶沛, 张梅, 马万龙, 等. 用于数字图像相关位移测量的一种改进爬山算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021506.
Ye P, Zhang M, Ma W L, et al. Improved climbing algorithm for digital image correlation displacement measurements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021506.
- [16] Wang H, Zhao J, Zhao J W, et al. The position detection method of a linear motor mover based on an extended phase correlation algorithm[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(7): 921-928.
- [17] Zhao J, Zhou Y, Zhao J W, et al. Precision position measurement of PMSLM based on ApFFT and temporal sinusoidal fringe pattern phase retrieval[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(12): 7591-7601.
- [18] Zhao J W, Wang H, Zhao J, et al. Precise positioning of a linear motor mover directly from the phase difference analysis[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1566-1577.
- [19] 徐峰, 姚恩涛, 冯嘉瑞, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的增量式拉线位移传感器误差补偿方法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(3): 335-341.
Xu F, Yao E T, Feng J R, et al. An error compensation method for an incremental pull-wire displacement sensor based on PSO-BP neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(3): 335-341.
- [20] 岳广, 孙文邦, 张星铭, 等. 航空面阵图像拼接的累积误差消除方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 20200529.
Yue G, Sun W B, Zhang X M, et al. Accumulated error elimination method for aerial array image stitching[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20200529.
- [21] 詹金刚, 王勇, 史红岭, 等. 应用平滑先验信息方法移除 GRACE 数据中相关误差[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1135-1144.
Zhan J G, Wang Y, Shi H L, et al. Removing correlative errors in GRACE data by the smoothness prior method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1135-1144.
- [22] 余文新, 胡小唐, 邹自强. 光栅纳米测量中的系统误差修正技术研究[J]. 计量学报, 2002(2): 101-105.
Yu W X, Hu X T, Zou Z Q. Research on the systematic error correction in grating-based nanometrology[J]. Acta Metrologica Sinica, 2002(2): 101-105.
- [23] 岳广, 孙文邦, 张星铭, 等. 航空面阵图像拼接的累积误差消除方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 20200529.
Yue G, Sun W B, Zhang X M, et al. Accumulated error elimination method for aerial array image stitching[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20200529.
- [24] 赵吉文, 宫凯歌, 赵静, 等. 基于非周期正弦条纹的直线电机动子位置测量[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 889-900.
Zhao J W, Gong K G, Zhao J, et al. Position measurement for a linear motor mover based on an aperiodic sinusoidal stripe image [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 889-900.
- [25] Rasmy L, Sebari I, Ettarid M. Automatic sub-pixel co-registration of remote sensing images using phase correlation and Harris detector[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2314.
- [26] Mathew M, Wisner B, Ridwan S, et al. A bio-inspired frequency-based approach for tailorable and scalable speckle pattern generation[J]. Experimental Mechanics, 2020, 60(8): 1103-1117.
- [27] Wang H, Zhao J, Zhao J W, et al. The position detection method of a linear motor mover based on an extended phase correlation algorithm[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(7): 921-928.

Reduction of Accumulated Error in Linear Motor Mover Position Measurement Based on Self-Adjusting Measurement Reference Chart

Zhao Jing, Zhu Long, Wu Zhenyu, Dong Fei*

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

Abstract

Objective In the high-precision-long-stroke manufacturing system, precise servo control of a motor determines the machining accuracy during manufacturing. Moreover, the value of the motor subposition is an important signal in the motor feedback control system, which determines the control precision of the linear motor servo system. Therefore, analyzing the position measurement algorithm for a high-precision-long-stroke linear electric motor is crucial. Currently, the linear electromotor measurement based on a digital image is mostly a short-stroke measurement and cannot achieve long-stroke precision measurement. However, with the continuous improvement of precision manufacturing requirements, the need for the accurate measurement of the displacement of long-stroke linear electric motor becomes extremely urgent. Moreover, unlike the two-frame image measurement system in short-stroke measurement, long-stroke measurement comprises a multi-frame image measurement system. The number of frames increases as the measurement distance increases, resulting in problems related to error accumulation. The cumulative measurement error is the most important factor that affects the measurement accuracy of rectilinear distance displacement. Hence, to address the issue of error accumulation owing to the displacement superposition of multiple frames during the measurement of the linear electromotor subposition, an error reduction algorithm based on machine vision with a threshold transform reference map was proposed herein.

Methods In this study, the phase correlation algorithm is used to obtain the whole pixel offset between two frames rapidly, and the corresponding distance of the registration image is translated to decrease the displacement deviation between the registration image and reference frame to <1 pixel. The gray gradient algorithm is used to measure the subpixel displacement of the translated image in a small range. To improve the measurement accuracy and range of adjacent frames, then, the reference map is set, and the displacement images at different moments are registered to obtain the displacement value at specific moments. When the displacement between the registration map and reference map exceeds the maximum measured displacement between two frames, the transformation threshold is set to dynamically adjust the reference map. Based on the number of threshold transformations, the dynamic - real-time position is obtained using displacement superposition. Compared with the method of stacking adjacent frame displacements to obtain long-stroke displacement values, the proposed method can effectively reduce the displacement stacking time and cumulative error.

Results and Discussions First, a one-dimensional image measurement system is designed based on the one-dimensional rigid body translation of the linear motor, and one-dimensional target images are generated and optimized to improve the accuracy of the measurement system, as shown in Figs. (1) and (3). The measurement range of the adjacent frame image measurement algorithm is optimized, and the measuring distance of displacement between two frames is extended, which lays a foundation for reducing the cumulative error. As shown in Fig. (6), the measurement range of the improved algorithm increases from 1 pixel to 189.54 pixel. Finally, the cumulative error reduction approach for a self-adjusting reference graph is proposed, which can reduce the cumulative error by ensuring high-resolution feedback from all positions through the changes in the reference graph, as seen in Fig. (7). The feasibility of the proposed method is verified via the experimental data in Figs. (10), (11), and (12). Fig. (11) verifies the feasibility of the proposed method, and demonstrates that its measurement accuracy is higher than the other methods. Fig. (12) verifies the robustness of the proposed method, which maintains a high level of measurement accuracy under low illumination conditions.

Conclusions In this study, by improving the measurement accuracy of adjacent frames and decreasing the cumulative error, the long-stroke measurement of linear electromotor displacement with high precision is realized. First, image registration is divided into two parts: whole pixel translation and subpixel high-precision measurement. The accuracy and range of the algorithm in adjacent frame displacement image measurements are improved via step calculation. Then, to reduce the cumulative error in the displacement measurement process of long-stroke electromotor subunits, a threshold transform reference graph is added to reduce the cumulative times of displacement. The feasibility and effectiveness of the

proposed method were verified via simulation and platform experiments. Experimental results show that compared with the traditional algorithm, the proposed method can effectively reduce the cumulative error by $>80\%$ and exhibit better cumulative error reduction under different illumination conditions. Therefore, the algorithm proposed herein can effectively reduce the cumulative error in the long-stroke measurement, which is conducive to the realization of high-precision measurement of the long-stroke linear electromotor displacement.

Key words linear motor; long-stroke displacement measurement; threshold setting; variable reference graph