由测试技

基于 MLS 检测的一维绝对位移的误差分析与标定*

张少峰 李 强 费 飞 杨德华

(南京航空航天大学 自动化学院 南京 211100)

摘 要:基于最大长度序列(MLS)的原理设计了一种图像靶标,采用单目视觉和激光位移传感器开展了一维绝对位移的检测实验。在较为理想的环境下,系统重复定位检测数据的标准差小于1μm。针对实际应用环境和系统安装状况,从镜头失 焦、照明不均匀、靶标的偏转及镜头倾斜等可能造成检测误差的情况,开展全面实验和分析,探讨了该一维绝对位移检测系统 的重复定位,并提出了改进方法。实验结果表明,采用最大长度序列所设计的靶标在镜头失焦情况下,一维位移检测的重复 定位测量数据的标准差小于1μm;通过改进算法使得照明不均匀测量数据的标准差小于1μm;靶标偏移角度不大于5°的情 况下,重复定位测量数据的标准差不超过1μm;而镜头倾斜角不大于3°的情况下,重复定位测量数据的标准差小于1μm, 最后,采用激光位移传感器对该一维绝对位移检测进行了系统标定,经标定,在以上环境和安装误差条件下,该系统测量数据 的均方根误差限制在了2μm。测试实验和数据分析结果表明,该基于最大长度序列的原理的一维绝对位移检测系统,可实 现高精度非接触精密位移检测,且具有系统结构简单、对实施工艺要求低和便于安装调试的优点。

Error analysis and calibration of one dimensional absolute displacement based on MLS detection

Zhang Shaofeng Li Qiang Fei Fei Yang Dehua

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: An image target was designed based on the principle of maximum length sequence(MLS), using monocular vision and laser displacement sensor carried out One-dimensional absolute displacement test. In a relatively ideal laboratory environment, It's show the standard deviation of the system's repeated location detection data was less than 1 µm. According to the actual application environment and system installation status, for loss of focus from the lens, uneven illumination, deflection of the target and tilt of the lens may cause the detection error, conduct comprehensive experiments and analysis, The repetitive positioning of the one-dimensional absolute displacement detection system is discussed and proposed the method of improved. The experimental results show the standard deviation of the repeated positioning measurement data detected by one-dimensional displacement is less than 1 µm when the lens is out of focus; That the standard deviation of the non-uniform measurement data of lighting was less than 1 μ m by improving the algorithm; When the targets under the condition of not greater than 5°, The standard deviation of the repeated positioning measurements is no more than 1 μ m; And the camera angle is not greater than 3°, the standard deviation of the repeated positioning measurements is less than 1 µm. The last, the one-dimensional absolute displacement measurement is systematically calibrated by using laser displacement sensor. Under the above environment and installation error conditions, the root mean square error of the system measurement data is limited to 2 μ m after the calibration. Test experiment and data analysis show the one-dimensional absolute displacement detection system is based on the principle of maximum length sequence can achieve high precision non-contact precision displacement detection, the system structure is simple and low requirement to implement process, advantages of easy installation and debugging.

Keywords: maximum length sequence; one-dimensional displacement visual detection; the camera out of focus; uneven illumination; target deflection; lens tilt; repeat positioning accuracy error; calibration

收稿日期:2018-10-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(U1531110)项目资助

0 引 言

基于机器视觉的非接触检测技术^[1-6]在国内外天文仪 器领域的应用日益广泛。但是,就目前的参考资料来看非 接触视觉位姿^[7]检测方法的精度尚不能满足望远镜副镜 调整机构度的要求^[8]。因此,寻找一种可以精确检测望远 镜副镜位姿变化的方法是本文研究的主要内容。首先建 立了一套性价比很高的能够用在实验环境下对一维绝对 位移进行检测的系统。设计了一种基于最大长度序列的 图像靶标^[9-10],将靶标固定在移动平台上,通过 CCD 相机 读取靶标信息,对获取的图像进行预处理,包括灰度化、滤 波除去噪声以及二值化等^[11]。根据靶标识别算法提取靶 标的精密位移信息,即被测对象的位移。此外,为了保证 此套系统能够为调整望远镜位姿改变做出准确测量,需考 虑系统本身的稳定性以及外界环境因素对于系统稳定性 的影响。

在应用视觉系统进行测量的过程当中,误差的存在是 不可避免的问题,为了获得精确的信息,需要考虑误差带 来的影响以及如何控制误差的影响。目前,视觉测量精度 研究比较多的都是从测量误差这一方面。2007年余慧杰 等[12] 就分析过双目视觉系统的测量误差,通过建立误差模 型得出了系统位置、光轴夹角变化以及距离方向的相关误 差结论,对以后的双目视觉测量系统的设计具有指导作 用。王兴龙等^[13]通过研究视觉测量误差对空间机械臂捕 获目标卫星控制精度的影响,也为空间机械臂的测量和控 制精度指标的设计提供了参考。霍炬等[14]基于共面特征 点进行了单目视觉位姿测量误差分析,对于提高实际测量 系统的解算准确度具有一定的理论指导意义。但是,考虑 系统稳定才能便于实际测量,必须对其重复定位精度进行 研究。邓辉等[15]也曾研究过基于机器视觉的重复定位精 度测量技术,该方法测定重复定位精度较千分尺方便且精 度较高,系统误差小且易于搭建,可用于测量精度在微米 以下各类设备的定位精度。

本文采用单目视觉测量平面位移,通过读取靶标的编码信息,靶标采用固定宽度条码组成,CCD相机一旦获取 了靶标图像,其图像像素对应的物理尺寸便确定,图像的 畸变可采用适当图像处理方法进行校正。整个检测系统 结构比较简单,并且实验当中的 CCD 相机无需标定。因 此,在考虑环境因素的时候,仅从镜头失焦、光照不均匀、 靶标不正以及镜头倾斜等可能会造成测量系统检测误差 的情况进行分析,并提出改进方法。最后对系统重新定标 保证其测量精度满足要求,为望远镜副镜位姿调整的六自 由度机构非接触的精密测量作好基础。

1 MLS 一维位移实验原理

最大长度序列(maximum length sequence, MLS)^[16] 是一连串的二进制数,为了将其应用到视觉测量,需要设



图 1 最大长度序列靶

实验装置如图 2 所示,在实验室当中,采用 6 级 MLS 序 列,周期为 $2^{\circ} - 1 = 63$ 进行完整黑白条编码,在 1 个周期中 每 6 个连续数字是不重复的。相邻白条间隔固定为1 mm, 白条自身宽也为 1 mm。将此靶标固定在位移平台上进行 图像采集,通过位移平台的移动可以得到两张不同位置的 图片,两张图片经过算法处理可以得到序列差,将其转化为 实际距离如式(1)所示,其中 n 是两张图片的序列差,白条 自身宽度加间隔宽度为 2 mm,计算后的距离为 S。

 $S = 2 \times n$



图 2 实验装置

但是,仅计算序列差值所得结果并不准确。因此,需 进行灰度一阶傅里叶拟合。拟合公式如式(2)所示,由于 靶标的特殊性只需考虑两张图片的相位差即可,通过相位 差来控制精度。

$$S_1 = A \times \sin(w \times x + \phi) + B \tag{2}$$

因此,最终实际距离Y如下式(3)所示。

$$Y = \left[n + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi}\right] \times 2 \tag{3}$$

• 69 •

(1)

基于这种实验原理,本文控制移动平台使得激光位移 传感器的示数分别为 0.495、1.000、1.495 mm 进行 7 组重 复定位位移实验,测量数据如表 1 所示,数据波动幅值在 1 μm。

	表	1 ML	S一维位	拉移重复	定位实	验 (mm)
组别	1	2	3	4	5	6	7
0.495	0.497	0.497	0.498	0.497	0.498	0.498	0.497
1.000	1.000	1.000	1.001	1.000	1.001	1.000	1.000
1.495	1.495	1.494	1.495	1.494	1.495	1.494	1.494

通过计算数据的标准差(standard deviation, SD)来反 应数据的离散情况,标准差计算公式如式(4)所示。

$$SD = \sqrt{(\sum_{i=1}^{n} (x_i - x)^2)/n}$$
(4)

其中 *x* 是数据的均值,经计算,3 组实验的 SD 分别约 为 0.7、0.5、0.5 μm。数据的标准差均不超过 1 μm,表明 一维绝对位移系统稳定且具有良好的重复性。因此,本文 测量系统具有实际研究意义。

2 系统误差的分析

2.1 镜头失焦对重复定位精度的影响

镜头失焦采集的图像如图 3 所示,黑白条纹边界变得 模糊。在经过滤波和二值化处理后的图片如图 4 所示,处 理的图片白色条纹变宽,黑色间隔变窄。但是,总的长度 没有变化,也就是最终拟合的周期没有变化。所以,可以 预计镜头失焦对重复定位精度影响不大。





图 4 镜头失焦图像处理

实验设计如下,控制精密位移平台平移使得位移传感 器示数分别为 0.497、0.330、0.707 mm,在此情况下重复 定位 7 组实验,并通过本文算法计算的实验数据统计如表 2 所示,数据波动的幅值在 1 μm。经式(4)计算的标准差 分别为 0.7、0.5、0.7 μm。因此,镜头的失焦对系统的重复 定位精度几乎没有影响,镜头失焦产生的重复定位数据的标准差保持在1µm范围内。表明本文的靶标设计以及识别算法对镜头失焦具有较好的稳定性。

表 2 镜头失焦重复定位实验 (mm)

组别	1	2	3	4	5	6	7
0.497	0.495	0.495	0.496	0.496	0.495	0.496	0.495
0.330	0.228	0.227	0.227	0.227	0.228	0.227	0.227
0.707	0.705	0.704	0.704	0.704	0.705	0.705	0.704

2.2 照明对测量影响

在实验室中,模拟照明的不均匀可以对光线进行部分 遮挡。采集靶标图像如图 5 所示,可以看到产生了部分黑 色阴影。



图 5 照明不均匀的靶标图像

通过全局阈值二值化处理^[17]后的图像如图 6 所示。 在此情况下,首先控制平台移动使得位移为 0.340 mm,经 系统算法计算结果为 70.338 mm,比较对应的二进制序 列,可以发现图 6 的识别序列不正确,在识别时产生了粗 大误差 70 mm,粗大误差应该首先消除,针对该问题,需要 改进图像处理的方法。采用局部阈值 OSTU 二值化的方 法处理图像如图 7 所示,保留了原有图像应该有的信息。 重复定位 7 组实验,测量数据如表 3 所示,数据波动幅值为 1 μ m。





图 7 局部 OTSU 二值化处理

		表 3 光	照不均	匀重复深	定位实验	₹ (mm)
组别	1	2	3	4	5	6	7
0.337	0.339	0.338	0.338	0.339	0.338	0.338	0.339
0.505	0.504	0.505	0.504	0.505	0.504	0.504	0.504
0.800	0.802	0.802	0.801	0.801	0.802	0.801	0.801

在用式(4)计算的标准差结果分别为 0.7、0.5、 0.7 μm,可以看出光照不均匀对系统的重复定位精度几乎 没有影响,数据的标准差稳定保持在了1μm以内,只是在 图片二值化的时候对阈值的选取有影响,会使图片信息部 分丢失,导致序列识别产生错误,进而出现粗大误差。本 文在改进算法后可以消除这种影响。因此,系统通过算法 的改进将对光照的不均匀具有较好的稳定性。

2.3 靶标的偏转对测量的影响

本文采用的灰度叠加是对图像的每一列的灰度值进 行 f(i,i) 累加,叠加的和 g(i) 如式(5)所示。

$$g(i) = \sum_{j=0}^{M-1} f(j,i), i = 0, 1, 2, \cdots, N-1$$
(5)

所以,在采用靶标灰度的叠加当中如果靶标发生偏转 有可能对系统的稳定性产生影响。

在实验过程中,通过激光位移传感器将电机重复位移 固定为 0.303 mm,并将靶标固定在可以实现角位移的电 机上,通过电机的旋转带动靶标的偏转,观察不同角度对 系统重复定位精度的影响,测量数据如表4所示。

角度/				组别			
(°)	1	2	3	4	5	6	7
0	0.305	0.304	0.304	0.305	0.304	0.305	0.305
1	0.296	0.296	0.296	0.297	0.297	0.296	0.297
2	0.298	0.296	0.297	0.297	0.298	0.297	0.296
3	0.298	0.297	0.298	0.296	0.296	0.296	0.297
4	0.297	0.296	0.296	0.298	0.296	0.297	0.296
5	0.293	0.293	0.295	0.295	0.294	0.295	0.294

表 4 靶标定位偏转测量数据 (mm)

由表4可知,靶标定位偏转角度大小对系统重复定位 测量的精度存在不同程度的影响,角度变大后重复定位测 量的数据波动幅值也在变大。但是,变大的范围较小,可 以看出靶标偏转到1°时数据波动幅值在1 μ m,而当角度偏 转到5°时数据的波动保持在2µm,经计算的标准差如表5 所示,数据的标准差虽然变大但控制在1μm内。因此,可 以知道本文提出的系统对靶标的偏转仍具有良好的稳定 性,靶标的偏转对系统的重复定位精度影响较小。

	表 5	不同角度	复测量数	:据的标)	准差	(µm)	
角度/(°)	0	1	2	3	4	5	
标准差	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	

角

2.4 镜头倾斜对测量误差的影响

在安装相机镜头的过程中,镜头不能保证与靶标平面 绝对垂直,不可避免地会引入安装误差。理论上,当镜头 存在一定倾斜度时,采集的矩形靶标图像会变成梯形。因 此,为了研究镜头倾斜对系统稳定的影响,需要进行实验 探究。镜头偏转3°采集的靶标图像如图8所示,可以看出 图像左边变窄,右边变宽。



到 8 镜头偏转 3 靴材	K.	8	镜头	偏转	3°靶	标	冬
----------------------	----	---	----	----	-----	---	---

实验当中,通过位移平台使传感器的示数重复为 0.499 mm,改变镜头的倾斜角。通过重复定位实验观察不 同角度下位移数据的规律。实际测量结果如表 6 所示,从 数据可以看出镜头的倾斜对系统的重复定位精度影响较 小,镜头倾斜达到 3°时,重复定位测量数据的波动幅值仍 然在1µm。通过计算标准差如表7所示,可以知道其仍然 保持在1µm 以内。

表6 镜头不同倾斜角测量位移 (mm)

角度/				组别			
(°)	1	2	3	4	5	6	7
0	0.499	0.498	0.499	0.498	0.499	0.499	0.498
1	0.498	0.497	0.498	0.497	0.497	0.498	0.498
2	0.496	0.497	0.497	0.496	0.496	0.496	0.497
3	0.496	0.495	0.496	0.496	0.495	0.496	0.496

表 7 镜头不同倾斜角测量标准差 (µm)

角度/(°)	0	1	2	3
标准差	0.7	0.7	0.7	0.5

在本文实验系统中,图像运算只需选取中心视场靶标 信息,有效降低了镜头偏转对检测精度的影响。相比于靶 标倾斜,对重复定位精度影响较小。因此,不必再研究更 大的角度,可以认为镜头的倾斜对系统稳定性影响较小, 降低了系统在镜头安装时的要求。

2.5 其他误差

1) 振动的影响。精密位移测量系统对于振动比较敏 感,摄像机和被测零件的微小振动,都可能使图像失真,从 而引起大的误差。本文检测系统装置于气动隔震平台上, 减小了外界振动对测量的影响。

2)温度的影响。由于该测量系统主要由电子器件构 成,则温度的变化对系统的性能也有较大的影响。CCD器 件是由许多光敏元件组成,易受外界温度的影响,从而影 响 CCD 器件的灵敏度和信噪比等。因此,应采取一定的措 施保证周围温度的恒定,以及使 CCD 摄像机远离热源。选 第 42 卷

用具有良好的温度特性的 CCD 摄像机,以保证系统在较恒定的环境温度下进行测量。

3)机械误差。CCD 摄像机的工作台等部件的调整的 非精确性,会导致机械误差的出现。在安装或维护 CCD 摄 像机时,需要保证 CCD 摄像机的感光面不受任何油污和灰 尘的影响。如果在感光面上存在油污和灰尘,就会在拍摄 所得的图像中产生一个固定的黑斑。

4)因镜头畸变而导致的图像非线性畸变,但是由于本 文测量系统靶标的特殊性以及只选取中心视场的靶标信 息,再经过前文对失焦、靶标不正以及镜头倾斜的研究,畸 变的误差影响很小,可以忽略。

5)测量系统的周围工作环境下的空气湿度、磁场、电 场等对该系统的影响虽然存在,但可忽略不计。

3 系统的标定

前文研究的都是系统的重复定位精度,通过前文研究 可知本文系统在外界环境的影响下仍然能保持稳定。但 是,仅仅稳定还不能满足实际测量要求,为使系统具有实 际测量意义,需要讨论系统的测量误差,并研究定位精度。

在研究系统重复定位精度的时候,通过观察数据可以 发现系统的测量误差并非在所有位置都能满足要求,误差 控制在较小的范围内。实际测量中系统的测量误差有时 会达到十几微米,这已经无法满足测量精度要求。因此, 为使系统测量误差能够满足要求,控制在合理的范围内, 需要对系统定标。这里利用激光位移传感器来对测量系 统重新定标。定标之前先任意确定一个位置定为O点,通 过对O点多次连续截取两张图片计算发现差值始终为 0 μm,这也从另一方面反应了系统稳定。再以此为原点每 次增加 0.1 mm,重复向后移动 10 次,作出误差与移动距 离的关系如图 9 当中的红色圆圈所示。



由图 9 中的数据可以看出,在以 O 点为原点的时候, 随着向后移动距离的改变,误差首先慢慢变大然后又有变 小的趋势,移动距离为 0.7 mm 的时候,测量误差达到了 12 μm。显然这是不够精确的,应该将其减小。 在观察图中的数据之后发现其变化趋势与一阶傅里 叶当中的一小段极为相似。因此,用式(6)对数据进行一 阶傅里叶近似拟合,得出系数如式(7)所示,曲线如图 9 所 示。可以看出测量误差均匀的分布在曲线的上下,为使系 统测量误差不随移动距离变化而发生累加,将拟合的曲线 值与系统测量值的差值的绝对值作为测量误差带入系统, 重新测量后的数据如表 8 所示,为了直观反映测量的准确 度,利用均方根误差(root mean square error, RMSE)来表 达,公式如式(8)所示,其中 X_i 为真值,但实际中一般为最 优值,它表示数据与真值之间的偏差,也就是准确度。由 表 8 中数据可知,测量误差最大为 2 μ m,考虑最坏的情况, 每次测量误差都为 2 μ m,代入式(8),计算结果仍是 2 μ m, 这应是系统测量数据最大的均方根误差。因此,可以认为 系统的均方根误差均不超过 2 μ m。

 $a0 + a1 \times \cos(x \times w) + b1 \times \sin(x \times w)$ (6)

 $0.0055 - 0.0048 \times \cos(3.756 \times x) + 0.001 \times \sin(3.756 \times x)$ (7)

$$RMSE = \sqrt{(\sum_{i=1}^{n} (x_i - X_i)^2)/n}$$
(8)

表 8 对比测试结果(mm)

组别	1	2	3	4	5
实际位移	0.200	0.303	0.405	0.600	0.700
测量位移	0.201	0.303	0.405	0.600	0.702
误差	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002

4 结 论

本文首先利用 MLS 设计图像靶标,并用单目视觉与 激光位移传感器进行一维绝对位移重复定位检测实验,实 验结果表明系统稳定,重复定位测量数据标准差小于 1 µm。由于靶标以及识别算法的特殊性,镜头失焦对检测 系统的重复定位精度误差几乎没有影响,测量数据的标准 差小于1 µm;关于照明不均匀对测量误差影响与图像处理 算法有关,采用局部 OTSU 二值化的图像处理算法,还原 不均匀照明条件下完整的靶标信息,可以获得稳定的测量 结果,重复定位测量数据标准差控制在了1 µm 以内;靶标 定位偏转角度大小对测量系统的重复定位精度存在不同 程度的影响,偏转角度越大标准差越大,通过研究发现靶标 偏转角度控制在5°范围内,在此条件下的实验结果表明,标 准差不超过1µm,系统稳定;在安装镜头时,使垂直度偏差 不超过 3°时,重复定位数据标准差在 1 μm 范围内。由实验 分析可知,本文测量系统可有效控制在镜头失焦、照明不均 匀、靶标定位不正以及镜头倾斜等环境对系统稳定的影响, 体现了测量系统的高鲁棒性。最后对系统重新定标,保证 其均方根误差也控制在 2 µm 以内,从而一整套系统可稳定 地用于实际测量,可实现高精度非接触精密位移检测。

• 72 •

参考文献

- [1] 郭瑞峰,袁超峰,杨柳,等.基于 OpenCV 的机器视觉尺 寸测量研究[J].计算机工程与应用,2017,53(9): 253-257.
- [2] 许楠楠,刘缠牢.光学元件外径的机器视觉测量技术研 究[J].光学仪器,2016,38(4):292-296.
- [3] 龚阶.基于机器视觉的卡簧测量算法研究[J].中国计量,2016(11):98-101.
- [4] 刘昶, 韦飞云, 孙维广. 基于双平行平面相机模型的钢板尺寸视觉测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 714-725.
- [5] 胥磊.机器视觉技术的发展现状与展望[J].设备管理 与维修,2016(9):7-9.
- [6] 黄松梅,毕远伟,刘殿通,等.双目立体视觉非接触式测量研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2017, 30(4):323-327.
- [7] 关瑞芬,杨凌辉,王丽君,等.基于正交柱面成像的空间 物体位姿精密测量[J].光学学报,2016,36(11): 126-134.
- [8] 徐刚,杨世模,龚雨兵.大型光学望远镜副镜位姿精调 机构的优化设计[J].光学精密工程,2008(7): 1181-1189.
- [9] 李强,杨德华,费飞,等.基于最大长度序列的绝对位移 精密检测方法[J].计算机测量与控制,2017,25(8): 32-35.

- [10] 杨德华,费飞,李开宇,等.一种基于视觉的位置检测 编码靶标及系统:201510201768.X[P].2015-04-24.
- [11] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟.基于 Otsu 方法的钢轨图像 分割[J].光学精密工程,2016,24(7):1772-1781.
- [12] 余慧杰,韩平畴.双目视觉系统的测量误差分析[J].光 学技术,2007(S1):157-159.
- [13] 王兴龙,周志成,曲广吉.视觉测量误差对空间机械臂 捕获目标卫星控制精度的影响分析[J].航天器工程, 2017,26(3):31-37.
- [14] 霍炬,崔家山,王伟兴.基于共面特征点的单目视觉位 姿测量误差分析[J].光子学报,2014,43(5):150-156.
- [15] 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.
- [16] 吕虹,段颖妮,管必聪.一种非线性最大长度伪随机序 列发生器的设计[J].电子器件,2008(3):898-900.
- [17] 郭皓然,邵伟,周阿维,等.全局阈值自适应的高亮金属 表面缺陷识别新方法[J]. 仪器仪表学报,2017, 38(11):2797-2804.

作者简介

张少峰,硕士研究生,主要研究方向为光机电系统与机器人技术。

E-mail:549289188@qq.com

杨德华(通信作者),教授,主要研究方向为光学精密仪器与系统。

E-mail:dhyang@nuaa.edu.cn