

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.06.06

线激光位移传感器像素当量标定方法

代洁, 马骊群, 高廷, 董雪明

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了满足线激光位移传感器的应用测试需求, 提出一种基于高度块的线激光位移传感器像素当量的现场标定方法。其中, 高度方向上的像素当量利用台阶高度进行标定, 以修正厂家设定的像素当量的线性误差; 宽度方向上的像素当量则利用台阶块结合传感器的横向移动位移的计算方法得到。考虑到线激光位移传感器可能存在安装倾斜误差, 利用台阶块宽度在不同位置的高度差对倾斜角进行了标定, 并修正了由倾斜角引入的高度测量误差。经实验证明, 本文提出的方法很好地解决了线激光位移传感器在多位置测量时轮廓不连续的问题。

关键词: 线激光位移传感器; CCD 像素当量; 标定

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)06-0031-05

A Method to Calibrating CCD Pixel Equivalent of Line Laser Scanning Sensor in-site

DAI Jie, MA Liqun, GAO Ting, DONG Xueming

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to meet the application and test requirements of linear laser displacement sensor, a field calibration method of pixel equivalent of linear laser displacement sensor based on height blocks is proposed, in which the pixel equivalent in height direction is calibrated by step height to correct the linear error of pixel equivalent set by the manufacturer. The pixel equivalent in width direction is calibrated by step blocks combined with the transverse direction of sensor the calculation method of moving displacement is obtained. Considering that the linear laser displacement sensor may have tilt error, the tilt angle is calibrated by the height difference of step blocks at different positions, and the height measurement error introduced by the tilt angle is corrected. Experimental results show that the method proposed in this paper can solve the problem of contour discontinuity in multi position measurement of linear laser displacement sensor.

Key words: line laser scanning; CCD pixel equivalent; calibration

0 引言

线激光位移传感器又称二维激光轮廓扫描传感器, 可以对复杂被测物表面进行精细结构轮廓扫描测量, 常用于铁轨轮廓、轮缘磨损扫描, 板材平面度、焊缝检测, 精密零部件轮廓扫描, 装配部件组装精度、间隙检测^[1-2]等。

决定线激光位移传感器测量能力的主要参数包括高度和宽度方向量程、线性度、扫描频率和激光线条上的成像点数。其中, 线性度与高度测量精度有关, 激光线条上的成像点数与宽度测量精度有关, 这两项指标都取决于线激光位移传感器中 CCD 成像传感器像素当量的标定精度。在规定的使用方法下, 传感器的像素当量都由厂家来标定, 利用标定结果可以获得满意的测量结果^[3]。因此, 大多数情况下使用线激光位移传感器测量轮廓时尽可能满足规定的方法为: 保持

传感器固定不变, 对测量范围内的物体进行测量。但是事实上很多测量过程都是将线激光位移传感器与运动控制单元(机器人、位移台等)结合, 以实现对被测物体的 3D 扫描。西南交通大学的熊仕勇等将两个二维激光位移传感器安装在一个专用检测梁上, 控制检测梁的行走, 以实现钢轨的截面轮廓测量^[4]。西北工业大学谭小群等利用机器人控制线激光扫描传感器解决飞机大部件自动化制孔过程中基准孔自动检测问题^[5]。这些应用中一般都关注线激光扫描传感器轮廓高度的测量能力, 而横向(宽度)和纵向的测量能力则由运动控制单元中的测量器件来决定^[6-7]。

实际上在线轮廓测量中, 轮廓的高度和与高度对应的宽度都非常重要, 由于宽度方向的位移比例与高度有关, 通常要根据被测量轮廓才能确定, 而轮廓的宽度方向上的位置是按照激光线条上的像素位置来给出的, 这就使得直接用像素位置来确定轮廓的宽度位

置所得到的轮廓与实际轮廓存在偏差。此偏差会因传感器的安装倾斜导致的高度偏差而被放大。本文根据线激光位移传感器的工作原理，建立线激光位移传感器的像素当量计算模型，通过模型确定了线位移传感器像素当量标定方法，同时给出线位移传感器安装倾斜角的标定方法和高度方向上的误差修正模型，以解决线激光位移传感器在多位置连续测量时，物体轮廓高度不连续的问题。

1 线激光位移传感器的工作原理及像素当量计算

线激光位移传感器又称为截面轮廓测量传感器。以欧姆龙的 ZG2 系列传感器为例，其工作原理为：以带状扩展的激光照射被测对象表面，利用 CCD 拍摄该反射光，对截面形状进行测量。线激光位移传感器的工作原理如图 1 所示，它是一种非接触型的传感器，根据 CCD 的摄像信息生成形状轮廓，计算被测物体表面所照射截面的瞬间形状参数(如高度、段差、宽度、位置、交点、斜率和截面积等)。

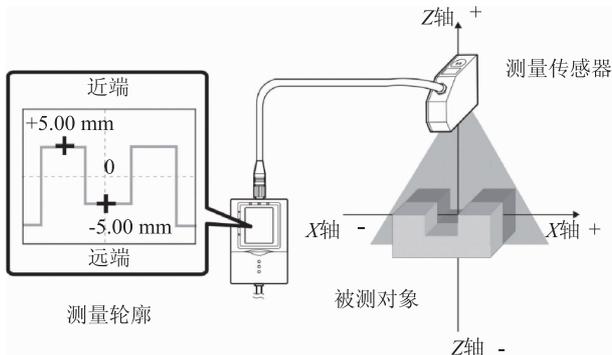


图 1 线激光位移传感器工作原理

在使用线激光位移传感器进行测量时，通常将激光光束方向定义为高度方向，即 Z 轴，将扫描方向(垂直光束方向)定义为宽度方向，即 X 轴。所测对象的轮廓可根据坐标位置进行数值描述。

1.1 高度方向上的像素当量

使用线激光位移传感器时首先需要考虑高度方向上的测量范围和分辨率，高度测量原理如图 2 所示，在扩散反射安装方式下，传感器发出的入射光垂直投射到物体表面，经反射返回到传感器的 CCD 像面上，根据 CCD 成像的高度方向的位置确定被测物体表面的高度。传感器的高度测量范围与 CCD 的感应区间有关，设定 CCD 高度方向的中心位置为传感器的测量中心，则 CCD 的最大高度像素值决定了测量极限空间。

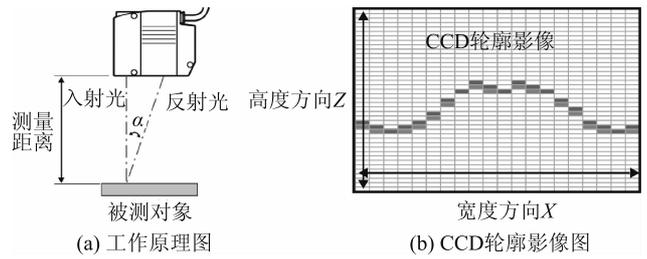


图 2 传感器高度测量原理图

传感器高度测量的精度取决于 CCD 图像单位面积的像素数(图像分辨率)，单位面积的像素数越多，图像分辨率越高，高度测量精度也越高。根据三角测距原理，当反射角确定时，测量的高度距离 h 与 CCD 像素值 V 的关系为

$$(h - h_0) = (V - V_0) \cdot k_v \cdot \tan\alpha \quad (1)$$

式中： h_0 为对应中心像素 V_0 所对应的高度(即测量中心)； k_v 为高度方向上的像素当量； α 为入射光与反射光的夹角。

由于 CCD 的每个像素具有相同的物理尺度，因此有

$$(h - h_0)/(V - V_0) = C \quad (2)$$

其中 C 为常数。推导可得

$$k_v = C/\tan\alpha = C_{k_v} \quad (3)$$

当入射光与反射光的夹角 α 固定后，高度方向上的像素当量 k_v 为常数 C_{k_v} 。可利用已知高度的量块等对传感器的高度像素当量进行比例修正。

1.2 宽度方向上的像素当量

入射光与反射光的夹角 α 固定后，高度的像素当量是常数，因此采用如图 2 所示的安装方式时高度像素当量不需要重新标定，只需确定宽度像素当量。为了使接收光无论距离远近都能够充满整个 CCD 视场，入射光是按照一定的扩散角 β 进行投射的，因此成像在 CCD 上的实际感应宽度值是不同的，如图 3 所示。宽度的像素当量与传感器的测量距离有关。

当中心距离为 L_0 时，中心感应宽度为 W_0 ，对应的像素当量 $k_{H_0} = W_0/PX$ ，其中 PX 是 CCD 宽度方向上最大有效工作区的像素数，是个常数。则当测量距离为 L 时，若对应的感应宽度为 W ，则

$$W = (H - H_0) \cdot \tan\beta + W_0 \quad (4)$$

此时的像素当量 k_H 为

$$k_H = W/PX = (H - H_0) \cdot \tan\beta/PX + k_{H_0} \quad (5)$$

式(5)表明，当扩散角 β 和中心宽度的像素当量确定后，宽度的像素当量与高度有关。

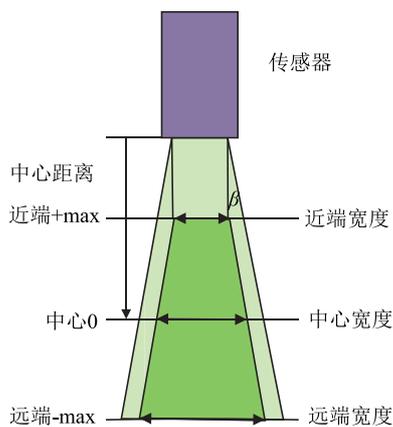


图3 线激光位移传感器测量区间

2 线位移传感器像素当量和安装倾斜角标定

2.1 线位移传感器像素当量标定

使用一个高度已知的台阶块(或量块)就可以方便地对传感器高度像素当量进行比例修正,同时标定出在该高度下的宽度像素当量,如图4所示。

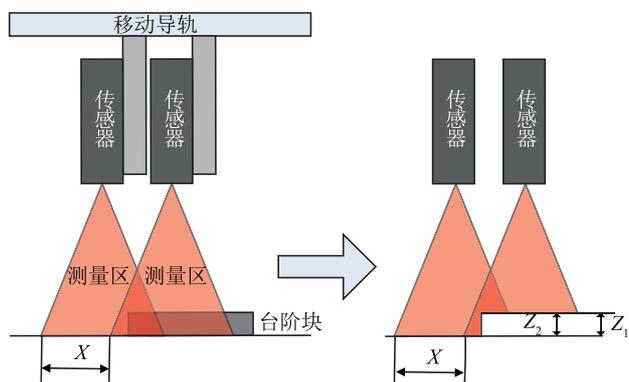


图4 宽度像素当量的标定

设传感器在初始位置所测量的台阶边缘高度为 Z_1 , 对应的像素宽度值为 PX_1 ; 传感器在移动距离 X 时所测量的台阶边缘高度为 Z_2 , 对应的像素宽度值为 PX_2 , 此时传感器测量得到的台阶块边缘高度值 $Z_1 = Z_2$, 假设台阶块的实际高度为 Z , 则传感器的高度像素当量比例偏差为

$$\Delta k_v = Z_1 / Z \quad (6)$$

在此高度下的宽度像素当量 K_H 为

$$K_H = X / (PX_1 - PX_2 + H_{max}) \quad (7)$$

式中: H_{max} 为传感器 CCD 宽度方向上的有效像素数。

2.2 线位移传感器安装倾斜角标定

一般情况下使用线激光位移传感器测量物体轮廓时,都是测量固定目标,即物体位置固定,传感器位

置也固定,这样按照标定好的像素当量就可以得到物体的轮廓数据。但在有些情况下需要采用其他测量模式,例如使用线激光位移传感器进行大型零部件的外形轮廓测量时,需将传感器安置在一个可移动的导轨上进行分段测量。在这种使用条件下,如果线激光位移传感器的入射光轴不能与移动导轨垂直,就会出现扫描轮廓在高度方向上不连续的问题,如图5所示。

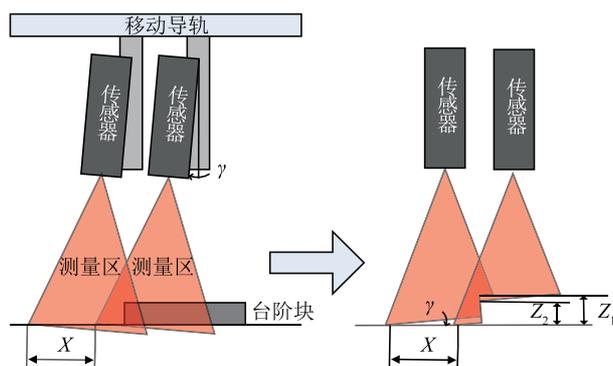


图5 安装倾斜角对轮廓测量的影响

为了解决这个问题,需要对传感器的安装倾斜角进行标定,根据标定后的倾斜角对轮廓高度进行修正。标定传感器的安装倾斜角时依然使用台阶块。设传感器在初始位置所测量的台阶高度为 Z_1 , 移动 X 后所测量的台阶高度为 Z_2 , 则传感器的安装倾斜角 γ 满足如下关系:

$$\tan \gamma = (Z_1 - Z_2) / X \quad (8)$$

根据标定后的倾斜角可对传感器的高度方向(Z 方向)测量结果进行修正。

设宽度方向上的总像素数为 H_{max} , 则图像中点位置的像素值为 $H_{max} / 2$; 若传感器初始位置为 X_1 , 对应台阶边沿的高度为 Z_1 , 台阶边沿的宽度方向的像素位置为 PX_1 ; 移动距离 X 后传感器的位置为 X_2 , 对应台阶边沿的高度为 Z_2 , 台阶边沿的宽度方向的像素位置为 PX_2 ; 则点 (PX_2, Z_2) 中 Z_2 的修正结果 ΔZ 为

$$\Delta Z = Z_2 + (PX_2 - H_{max} / 2) \cdot k_H \cdot \tan \gamma \quad (9)$$

式中: $k_H = (X_2 - X_1) / (PX_1 - PX_2 + H_{max})$ 为 Z_1 高度下的宽度像素当量。

3 实验结果及分析

使用一个欧姆龙的 ZG2 系列传感器进行实验验证,传感器宽度方向上的有效像素数为 631。将一个与被测轮廓高度接近的量块放置在传感器下方的基础面上,移动传感器至位置 1,量块的边缘进入测量范围,得到

如图 6(a)所示的测量轮廓, 然后移动传感器至位置 2, 得到如图 6(b)所示的测量轮廓。按照公式(7)、公式(8)得到宽度像素当量和安装倾斜角, 如表 1 所示。

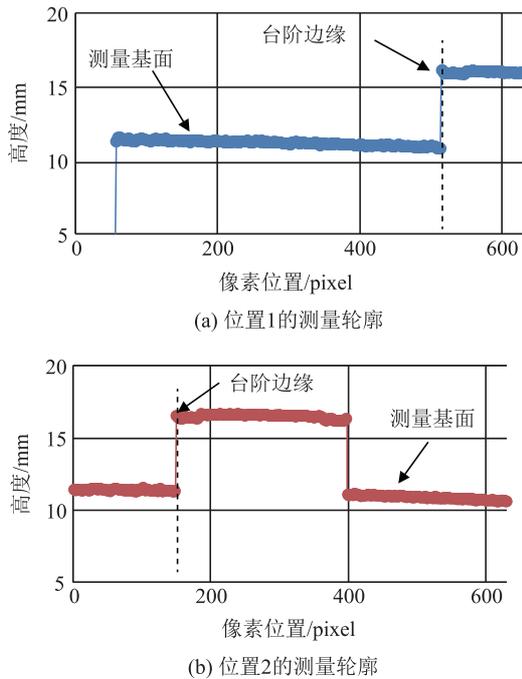


图 6 台阶的轮廓

表 1 传感器宽度像素当量计算

位置	传感器位置/mm	台阶高度值/mm	台阶像素位置/pixel
1	55.7	16.00	515
2	92.22	16.55	150(+631)
差值	36.52	0.55	266
宽度像素当量/(mm · pixel ⁻¹)			0.1001
传感器的安装倾斜角/(°)			0.87

根据计算得出的当量结果对台阶的宽度赋值, 赋值后的轮廓如图 7 所示, 从图 7 中可以看出两个不同位置的台阶边缘位置重合在了一起。但台阶的轮廓并没有重合, 产生这种现象的主要原因是传感器相对于测量基面存在倾斜角。

按照公式(9)对所测量轮廓的高度值进行修正, 修正后的轮廓如图 8 所示, 其中台阶边缘的位置如表 2 所示。

从图 8 中可以看出, 经倾斜修正后两个位置的轮廓相互重合, 根据表 2 中边缘位置的偏差可以看出, 修正后的高度偏差为 0.02 mm, 宽度偏差为 0.01 mm。如果对轮廓的图像进行亚像素处理, 修正的精度还能

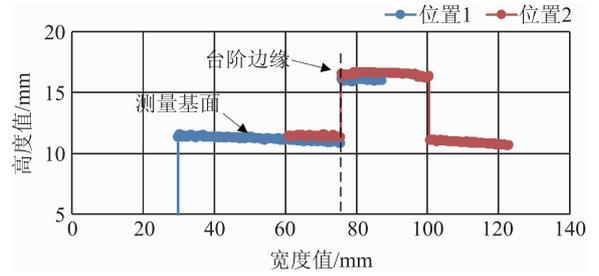


图 7 宽度当量标定后的台阶轮廓

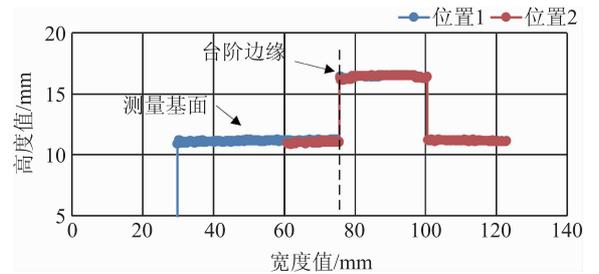


图 8 倾斜修正后的台阶轮廓

表 2 倾斜修正后台阶边缘的位置

位置	传感器位置/mm	台阶高度值/mm	台阶宽度值/mm
1	55.70	16.32	75.61
2	92.22	16.30	75.60
差值	/	0.02	0.01

进一步提高。此外从图 8 中还可以看出, 在测量基面与台阶具有 5 mm 高差的情况下, 基面的高度也得到了很好的修正。

4 结束语

本文提出了基于台阶块的适用于工业现场的线激光传感器像素当量标定方法及传感器安装倾斜角标定方法, 建立了线激光传感器的像素当量计算模型和传感器安装倾斜角对高度测量结果的修正模型。通过对欧姆龙的 ZG2 型线激光传感器进行标定试验, 验证了本文提出的标定方法的有效性, 为线激光位移传感器的校准提供了技术支持。

参考文献

- [1] 刘博文, 陈世利, 杨毅, 等. 基于多线激光扫描的叶片轮廓快速测量系统标定方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(6): 106-111.
- [2] 范力予, 李志勇, 杨军涛, 等. 基于线激光扫描的工业焊缝外观检测系统[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 102-106.

- [3] 徐淑婷. 线激光在机测量关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [4] 熊仕勇, 陈春俊, 王锋. 基于2D的钢轨轮廓特征点提取方法研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 17-21.
- [5] 谭小群, 唐婧仪, 于薇薇, 等. 基于线激光扫描和图像处理的基准孔检测技术研究[J]. 现代制造工程, 2019(4): 115-121.
- [6] 张德福, 葛川, 李显凌, 等. 高精度位移传感器线性度标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 24-30.
- [7] 刘博文. 叶片轮廓快速扫描系统开发与研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2019-11-13

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205B094)

作者简介

代洁(1967-), 工程师, 主要研究方向为几何量计量测试技术。



第3届世界质量论坛暨第13届上海国际质量研讨会在沪举行

2019年12月5日, 由国际质量科学院和上海市质量协会共同举办、以“无边界的质量世界”为主题的第3届世界质量论坛暨第13届上海国际质量研讨会在上海交通大学举行。上海市副市长许昆林、国际质量科学院(IAQ)院长伊丽莎白M·凯姆出席开幕式并致辞, IAQ荣誉院士、原理事长加纳克·梅塔主持开幕式和发表主旨演讲。

国际质量科学院是全球顶尖质量学术组织, 由美国质量学会、欧洲质量组织和日本科技联共同发起成立, 致力于质量思想、技术和方法的研究和全球推广应用, 成员来自全球40多个国家和地区。近年来, 因看好中国经济和上海的质量创新活力, 前两届在欧盟国家举办的世界质量论坛首次移师上海, 并吸引了包括来自全球13个国家和地区的近30位质量院士、多个国家质量组织、全国和行业领先企业、高校和政府部门等近300名中外嘉宾和代表参加。

随着互联网、大数据、人工智能等新技术、新模式的蓬勃发展, 质量的内涵更加丰富, 质量的边界更趋消融, 面对的是一个“无边界的质量世界”。上海是中国最大的经济中心城市, 也是一座开放、创新、包容、追求卓越的城市。许昆林认为在“无边界的质量世界”里, 要加强协同创新, 共建质量之业; 要凝聚各方力量, 共谋质量之治; 要包容开放, 共享质量之利。他希望国际质量科学院等国际质量组织着力寻求各国质量文化的共性、共识, 促进多元框架下的质量文化交流融合, 鼓励质量最佳实践的分享, 共同推进质量科学的理论研究和实践应用, 让质量引领全球发展美好未来。

伊丽莎白M·凯姆认为, 随着全球化、数字化的快速发展, 顾客对产品和服务质量的需求和期望持续提高, 质量管理的环境和基础发生了改变, 质量的内涵和外延发生了快速而深刻的变化, 既有的质量管理理念、方法与模式面临着变革。

上海市市场监管局局长陈学军表示, 作为上海市质量工作的主管部门, 高度重视加强国际质量交流与合作, 积极支持上海市质量协会发挥质量专业组织的桥梁纽带作用, 通过举办国际质量论坛、国际质量研讨会等质量交流活动, 不断对接先进的质量管理经验和方法, 为上海高质量发展提供助力。

围绕大会主题以及“质量专业的未来”“数字化和质量创新”“质量文化的价值”“服务质量与客户体验”“可持续和质量以及政府政策与质量”等议题, IAQ荣誉院士、前院长格里高利·沃森主讲了“无边界的质量世界: 全面系统融合质量”; IAQ荣誉院士、东京理工大学荣誉教授狩野纪昭分享了“无边界质量世界中超越满意的顾客愉悦卡诺模型”; IAQ院士、瑞典质量研究院院长曼茨·德莱德就“在动荡的当今世界赢得成功”进行了主旨演讲。上海交通大学副校长奚立峰与嘉宾们分享了“数字与智能时代的质量创新实践”。

(摘自 计量测控)