

激光三角测量中物面反射光斑重心偏移的修正

周兴敏 刘恒彪 葛剑敏

同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092

摘要 在进行激光(单)三角测量时,投影光束轴线的偏摆或投影光束在物面反射率不均匀处反射光斑重心的偏移会造成物面轮廓高度的测量误差。提出了采用双三角光路修正投影光束轴线偏摆和投影反射光斑重心偏移的方法,推导了修正公式;通过对物面反射率突变处轮廓高度的测量实验,验证了修正方法及公式的正确性;对灰度条模板表面轮廓进行双三角测量,轮廓高度均方根偏差小于0.07 mm。

关键词 测量;光斑重心偏移修正;光学三维传感;激光双三角法

中图分类号 TH741 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0512001

Reflected Spot Center Offset Correction in Laser Triangulation Measurement

Zhou Xingmin Liu Hengbiao Ge Jianmin

School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract During the laser (single) triangulation measurement, the measurement error of the surface profile height is caused by the deflection of projecting beam axis or the reflected spot center offset of projecting beam shining on object surface with nonuniform reflectivity. A method is introduced to amend the deflection of projecting beam axis and the reflected spot center offset of projecting beam by using dual-triangulation light path, and a modifier formula is deduced. It is proved to be right through the profile height measurement on the reflectivity mutation position of the object surface. According to dual-triangulation measurement of the grayscale stripe template profile, the root mean square deviation of the profile height is less than 0.07 mm.

Key words measurement; light spot center offset correction; optical three-dimensional sensing; laser dual-triangulation method

OCIS codes 120.2830;040.1880;110.2960

1 引言

激光三角测量^[1-4]是一类典型的光学三维传感方法,具有非接触、材料适应性广、系统结构简单、测量精度高、测量范围大、可用于在线实时测量等优点,得到了广泛的应用。具有单三角光路的激光三角测量系统只能测量轮廓变化较为平缓的表面。采用激光双三角测量系统则能突破这种限制,测量具有一定宽度的沟槽轮廓^[5]。当用这个双三角测量系统测量一块平贴的中间印有黑色图案的白纸时,发现由测量头的左、右三角光路测得的纸面高度数据明显不一致:在白-黑交界处,左三角光路测得的高度比右三角光路测得的要低;在黑-白交界处,则相反。这种现象出现的原因可以归结为投影光束反射光斑重心的偏移:在白-黑交界处,黑色区域的反射率低,反射光斑的重心向左偏移;在黑-白交界处,反射光斑的重心向右偏移。为减小这种偏移对三角测量精度的影响并保证足够的物面轮廓横向扫描分辨率,可以采用直径很小的投影光束^[6],但这会增加测量头的复杂性。本文提出一种投影光束反射光斑重心偏移的修正方法,由于物面反射率不均匀导致的投影光束反射光斑重心偏移与投影光束轴线偏摆^[7]的效果相同,下面的讨论适用于这两种情形。

收稿日期: 2014-10-24; 收到修改稿日期: 2014-12-12

作者简介: 周兴敏(1991—),男,硕士研究生,主要从事噪声与振动控制方面的研究。E-mail: chow910327@126.com

导师简介: 刘恒彪(1962—),男,博士,教授,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: liuhb62@tongji.edu.cn(通信联系人)

2 激光双三角测量原理

一个满足 Scheimpflug 条件的对称型激光双三角测量系统如图 1 所示。两透镜的成像光轴与源自激光器的投影光轴都成 θ 角并交于参考点 R 。两个成像光斑探测面与各自透镜的成像光轴成 β 角。当激光器发出的点状激光束照射到被测物面某点 O 上时,光束产生漫反射并在左、右探测面上成像。当被照物点的位置发生改变时,在探测面上的像斑也会相应移动。通过检测像斑中心 P_1, P_2 相对于各自探测面轴上点 D_1, D_2 的位置,应用事先建立的被照物点位移与像斑中心位移的关系式,就可计算出被照物点 O 相对于参考点 R 在投影光轴上的位移值。

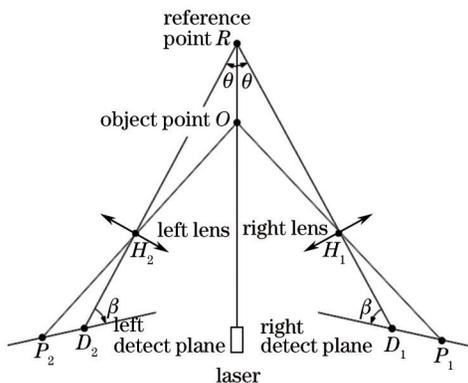


图 1 激光双三角测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser dual-triangulation measurement

在图 1 中,以参考点 R 作为坐标原点,被照物点 O 的位置为 z (向下为正方向)。在左/右成像光轴上,物距 RH_1 和 RH_2 、像距 H_1D_1 和 H_2D_2 分别为 l, l' 。在两探测面上,分别以 D_1, D_2 为坐标原点来度量像斑中心 P_1 和 P_2 的位置 δ (在左/右探测面上, δ 的正方向为向左/向右)。根据几何关系得到适用于左、右两个三角光路的测量公式^[5,8]:

$$z = \frac{l\delta \sin \beta}{l' \sin \theta + \delta \sin(\theta + \beta)}. \quad (1)$$

根据图 1 的光路,本课题组曾设计、构建了一个激光双三角测量头,用于测量轮胎花纹沟槽轮廓^[5]。测量头光学设计参数为:成像透镜焦距 $f' = 60$ mm,物距 $l = 250$ mm,像距 $l' = 78.95$ mm,垂轴放大率 $k = l'/l = 0.32$,投影光轴与成像光轴的夹角 $\theta = 10^\circ$,探测面与成像光轴的夹角 $\beta = 29.18^\circ$ 。为使测量头结构紧凑,在成像透镜和探测面之间加装平面反射镜来转折光路,使左、右三角光路的像斑落在同一片线阵电荷耦合器件(CCD)上。利用这个构建好的测量头开展了本文介绍的实验工作。

激光三角测量的灵敏度可由(1)式求导得到

$$\frac{dz}{d\delta} = \frac{l' \sin \theta \sin \beta}{[l' \sin \theta + \delta \sin(\theta + \beta)]^2}. \quad (2)$$

这个灵敏度还决定了成像光斑中心检测误差对被照物点位置测量误差的影响。在实验采用的激光双三角测量头中,CCD 总共有 5000 pixel,每个像素长度为 $7 \mu\text{m}$ 。若将 CCD 的总长度均分,分别用于左、右三角光路上像斑的探测,即每个三角光路的像斑探测范围为 17.5 mm,且假定探测面上的坐标原点处于各自三角光路探测范围的中间。那么,根据(2)式,在 $\delta = -8.75$ mm 处,三角测量灵敏度达到最大值 24.96。也就是说,若成像光斑中心检测误差达到 1 pixel,对被照物点位置的测量误差可能达到 0.17 mm。所以,对成像光斑中心的准确检测,是提高三角测量精度的关键。

3 成像光斑重心偏移的修正

激光三角测量中成像光斑的强度分布通常是不规则的(原因如:投影光束源自半导体激光器,电路噪声干扰等),提取其重心作为像斑中心是一种最佳选择。现在讨论引言中提出的被测物点反射光斑重心偏移问题。物点反射光斑重心的偏移有两个原因:一个是投影光束轴线偏摆,另一个是物点处光反射率不均匀。这两个原因都会导致在被测物点处反射光斑重心相对于理想投影光轴的偏移。下面借助图 2 讨论这种偏移的修正问题。

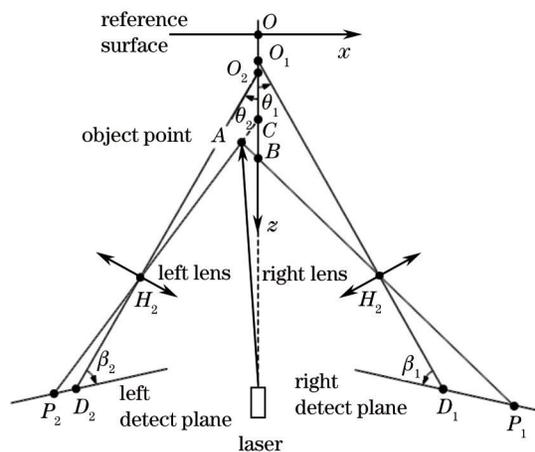


图2 物点反射光斑重心偏移的影响

Fig.2 Effect of reflected spot center offset

对于一个按对称型设计的激光双三角测量头,由于在加工、装配过程中难免存在误差,左、右三角光路不可能是完全一致的。在图2中,以 O_2, O_1 点分别表示左、右三角光路中理想投影光轴与成像光轴的交点。假设由被测物点的反射光斑重心偏移移到A点。A点在左、右探测面上的投影分别是 P_2 和 P_1 。在物点反射光斑重心不偏移的情况下, P_2 和 P_1 分别对应物点C和B。对于左/右单个三角测量光路来说,在 P_2/P_1 处的像斑信号并不能判定是来自于A点或C/B点。双三角测量光路则能测定A点的位置。

在 xz 坐标系中,设A,B和C三点坐标分别为 $(x, z), (0, z_1)$ 和 $(0, z_2)$ 。其余各点坐标分别为 $O_1(0, z_{01}), O_2(0, z_{02}), H_1(l_1 \sin \theta_1, l_1 \cos \theta_1 + z_{01}), H_2(-l_2 \sin \theta_2, l_2 \cos \theta_2 + z_{02})$,其中下标2和1分别表示左、右三角光路的系统参数。

由 H_1 和B的坐标可得过此两点的直线方程:

$$z = \frac{l_1 \cos \theta_1 + z_{01} - z_1}{l_1 \sin \theta_1} x + z_1 \quad (3)$$

同理,直线 H_2C 的方程为

$$z = \frac{z_2 - z_{02} - l_2 \cos \theta_2}{l_2 \sin \theta_2} x + z_2 \quad (4)$$

联立两方程解得

$$\begin{cases} x = \frac{(z_1 - z_2)l_1 l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2}{(z_2 - z_{02} - l_2 \cos \theta_2)l_1 \sin \theta_1 - (l_1 \cos \theta_1 + z_{01} - z_1)l_2 \sin \theta_2} \\ z = \frac{(z_2 - z_{02} - l_2 \cos \theta_2)z_1 l_1 \sin \theta_1 - (l_1 \cos \theta_1 + z_{01} - z_1)z_2 l_2 \sin \theta_2}{(z_2 - z_{02} - l_2 \cos \theta_2)l_1 \sin \theta_1 - (l_1 \cos \theta_1 + z_{01} - z_1)l_2 \sin \theta_2} \end{cases} \quad (5)$$

将左、右三角光路的测量值 z_2, z_1 和测量头的系统标定参数代入(5)式,就可计算出A点的坐标。

4 激光双三角测量实验

通过(1)式由像斑重心位置 δ 来计算被照物点的位置 z ,必须先确定左、右三角光路的四个参数 l, l', θ, β 。尽管在激光双三角测量头设计时,这些参数是已知的,由于测量头的加工、装配误差,这些参数需要进行实验标定。另外,测量头在第一次标定后,日常可能遭受的强振动会使其中的光学、光电元件位置错位,每隔一段时间必须再次进行实验标定。

本次激光双三角测量头的标定实验按如下方式进行:将测量头安装在一个受计算机程序控制、由步进电机驱动、重复定位精度小于 $3 \mu\text{m}$ 的电动平移台上。在光学平台侧面贴上一片作为被测物面的白色打印纸(毛面朝外)。使平移台的运动方向与纸面垂直,测量头投影光轴与平移台的运动方向平行,投影光斑落在纸片中间,并使测量头前端面到纸片的距离约为 175 mm 。控制平移台朝远离纸面的方向,以 0.12 mm 的步距移动991步。在平移台每步移动的间歇,每采集10次CCD信号,叠加平均得到像斑强度分布信号;对此强度分布信号进行滑动平均滤波,处理并记录测量头中左、右三角光路的像斑重心位置;如此重复提取像斑重心

位置 20 次, 计算平均值。这样得到在 118.8 mm 范围内, 物面位置与左、右三角光路的像斑重心位置的实验映射关系。为提高实验映射关系的精度, 可根据(1)式构造拟合函数:

$$z_c = \frac{l(\delta_c - \delta_0)\sin\beta}{l' \sin\theta + (\delta_c - \delta_0)\sin(\theta + \beta)} + z_0, \quad (6)$$

以实验映射曲线的拟合曲线作为三角测量的映射关系。(6)式中, z_c 是测量头相对于被测纸面的坐标位置实验值, 坐标原点处于测量头行程的中心, δ_c 是像斑重心位置的实验值, 坐标原点在预估光轴处, z_0 是待求的投影光轴与成像光轴交点相对于 z_c 的坐标原点的偏差值, δ_0 是待求的成像光轴与探测面交点相对于 δ_c 的坐标原点的偏差值, 其余四个待求参数 l, l', θ, β 的物理意义与(1)式中相同。曲线拟合得出的测量头左、右三角光路的标定参数列于表 1。左、右三角光路实验映射曲线与各自拟合曲线的标准偏差分别为 0.041 mm 和 0.067 mm。从表 1 中容易看出, 投影光轴分别与左、右成像光轴的交点不在一处。图 2 显示了左、右三角光路的这种关系。

表 1 激光双三角测量头标定参数

Table 1 Calibration parameters of the laser dual-triangulation measuring head

| Parameter | l/mm | l'/mm | $\theta/(\text{°})$ | $\beta/(\text{°})$ | z_0/mm | δ_0/mm |
|-----------|---------------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Left | 250.1474 | 79.0452 | 28.9256 | 10.3639 | 20.0305 | 2.1328 |
| Right | 249.2012 | 78.6959 | 29.0173 | 9.8993 | 16.8921 | 1.7371 |

为检验用上述方法修正被测物面反射光斑重心偏移的效果, 设计了一个由不同灰度条组成的测量模板, 见图 3。模板中, 每个灰度条及分开两相邻灰度条的白色本底的宽度都为 5 mm。在白色打印纸上打印出模板, 平整粘贴在一块厚铝板上。用激光双三角测量系统测量模板中各灰度条的边界点, 即图中水平中线 I-I 分别与垂线 1-1、2-2、3-3、4-4、5-5 和 6-6 的交点处。图 4 给出了在 6 个测点上的测量结果, 其中图 4(a) 显示了投影光束反射光斑重心在 x 方向的偏移, 图 4(b) 显示了左三角(点划线)、右三角(虚线)和双三角(实线)测得的物面轮廓高度值。结果表明: 在白-灰或灰-白交界处, 投影光束反射光斑重心总是向白方偏移; 交界处的灰度值突变越大, 偏移量 x 的绝对值越大。反射光斑重心在 x 方向的偏移导致左、右三角光路测得的物面轮廓高度 z_2 和 z_1 不一致; 偏移量 x 的绝对值越大, z_2 和 z_1 的差别越大。这些结果符合上述理论分析的预期。

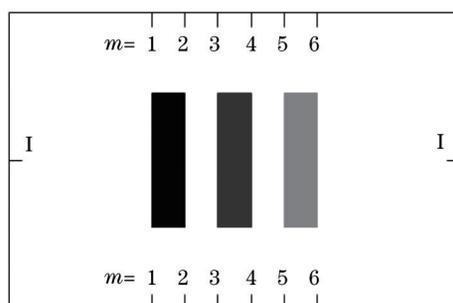


图 3 灰度条模板

Fig.3 Grayscale stripe template

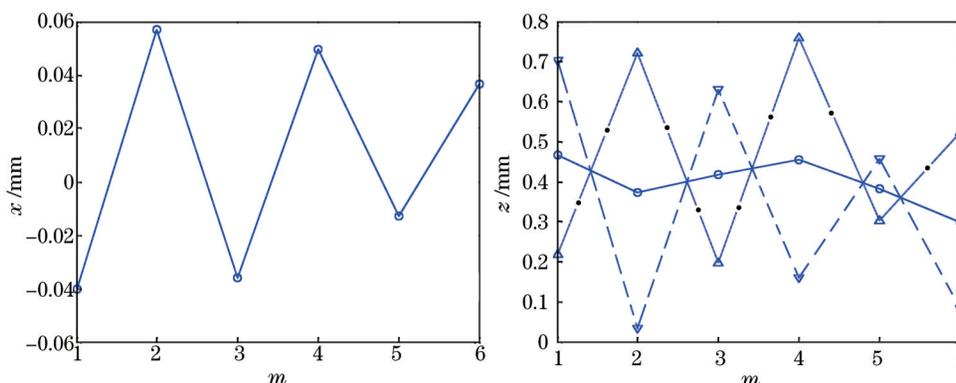


图 4 对各灰度条边界的高度测量结果: 点划/虚/实线由左/右/双三角光路测得

Fig.4 Results of height measurement on the edge of each grayscale stripe: dotted/dashed/solid line represents the result of left/right/ dual triangulation

在灰度条模板的水平中线 I-I 上用激光双三角测量头进行扫描测量,能得到模板的表面轮廓,见图 5。扫描自模板中第一个白-灰交界线左侧 2 mm 处开始,从左向右进行。分析测量结果得出:模板表面相对于投影光轴的垂直面略微倾斜,轮廓波动的均方根偏差小于 0.07 mm;在各灰度条区域,轮廓波动较大,原因在于由 CCD 检测的成像光斑强度较弱,造成了较大的像斑重心提取误差。

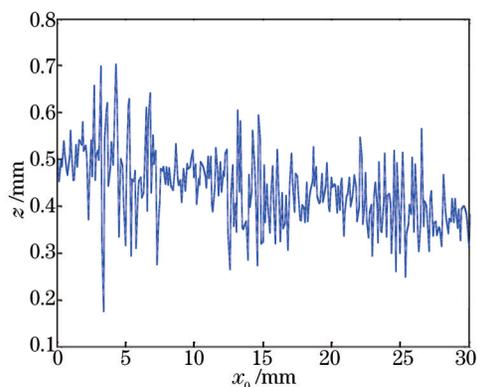


图 5 灰度条模板的表面轮廓

Fig.5 Surface profile of grayscale stripe template

5 结 论

激光双三角测量能够修正单三角测量不能消除的投影光束轴线偏摆和投影光束反射光斑重心偏移,提高物面轮廓高度测量精度。对物面灰度突变处高度值的测量实验表明,提出的投影光束轴线偏摆和投影光束反射光斑重心偏移修正方法及公式是正确的。对灰度条模板表面轮廓进行双三角测量,分析得出轮廓高度均方根偏差小于 0.07 mm。

参 考 文 献

- 1 Nikola Vukašinovic, Drago Bračun, Janez Možina. A new method for defining the measurement-uncertainty model of CNC laser-triangulation scanner[J]. Int J Advan Manuf Technol, 2012, 58(9): 1097-1104.
- 2 Axel Donges, Reinhard Noll. Laser Measurement Technology[M]. Berlin: Springer, 2014: 247-278.
- 3 Zhang Dejin, Li Qingquan, He Li. A new method for laser rut depth measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112005.
张德津, 李清泉, 何莉. 一种新的激光车辙深度测量方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112005.
- 4 Wu Di, Lü Qieni, Ge Baozhen. Development of oil film thickness sensor based on buoy[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108004.
吴 颀, 吕且妮, 葛宝臻. 浮标式油膜厚度测量传感器的研制[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108004.
- 5 Liu Hengbiao, Liu Chenglin, Ge Jianmin. Laser dual-triangulation measurement for groove profile[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s112006.
刘恒彪, 刘成林, 葛剑敏. 沟槽轮廓的激光双三角测量[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s112006.
- 6 Zhou Liping, Zhao Bin, Li Zhu. Research on laser triangulation measurement system with non-diffraction beam[J]. Laser Technology, 1998, 22(1): 22-25.
周莉萍, 赵 斌, 李 柱. 无衍射光束在激光三角测量系统中的应用研究[J]. 激光技术, 1998, 22(1): 22-25.
- 7 Ding Xiaokun, Liu Tiegeng, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208006.
丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208006.
- 8 Dai Liming, Jiang Tongjun. The laser triangulation measuring sensor for accurate displacement measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1994, 15(4): 400-404.
戴立铭, 江潼君. 激光三角测量传感器的精密位移测量[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(4): 400-404.

栏目编辑: 何卓铭