

文章编号 1004-924X(2016)增-0057-09

激光三角测距中的光斑形状修正

张正琦, 陶 卫, 杨红伟, 毛义梅, 赵 辉*
(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:分析了激光三角测距中成像光斑形状不对称的产生原因,采用光学系统建模的方法对光斑形状进行了有效的修正。应用 Zemax 软件对系统光学部分进行模拟仿真,得到漫反射光斑的最小像差成像点。在建立的三维空间坐标系中利用成像点坐标数据建立一个虚拟光学成像系统模型,应用光线追迹的方法得到实际光学成像系统与虚拟光学成像模型中像元光强的转换关系从而得到相应的修正系数。然后,用修正系数对光斑采样数据进行修正后通过质心法求出光斑中心。实验表明,应用该方法可将外界环境变化带来的光斑中心定位重复性误差减小至原来的 50%,测距系统整体的非线性误差达到 $\pm 0.125\%$ 。该方法在基本不改变测距系统测量速度的前提下,有效的减小了外界环境变化带来的误差,提高了系统的稳定性和抗干扰能力。

关键词:激光三角测距;质心法;聚焦点建模;光线追迹

中图分类号:TP212.12;TH744.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0057

Spot modification in laser triangulation displacement measurement

ZHANG Zheng-qi, TAO Wei, YANG Hong-wei, MAO Yi-mei, ZHAO Hui*

(College of Electronic Information and Electric Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: hui Zhao@sjtu.edu.cn

Abstract: The mechanism of the dissymmetric light spot shape in the laser triangulation was analyzed, and the mass center of the spot was corrected effectively by optical system modeling. Firstly, Zemax software was used for analog simulation of the optical system to acquire the minimum aberration imaging point of diffuse reflection spot. Secondly, a virtual optical imaging system model was established according to the coordinate data of imaging points in the built three dimensional space coordinate system, thus the transformation formulas of pixel intensities between actual optical imaging system and virtual optical imaging model were deduced through ray tracing for calculation of the corresponding correction coefficient. Finally, the light spot center was obtained by centroid method after the sampling data of light spot was corrected by the calculated coefficients. Experiment result indicates that this method can decrease the repeatability error of light spot center positioning caused by the external environment to 50% of the original one, with the overall non-linear error of ranging system reaches $\pm 0.125\%$. The proposed method can effectively decreased the error caused by external environment change and improved stability and anti-disturbance capacity without basic change of the measuring speed of ranging system.

Key words: laser triangulation ranging; centroid method; focus point modeling; ray tracing

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-12.

基金项目:闵行区科委资助项目(No. 2014MH116)

1 引言

随着工业 4.0 时代的到来,高精度测量这个与工业生产制造息息相关的新兴领域开始得到人们的重视。作为高精度测量的一个分支,位移测量技术也在不断发展,主要体现在测量精度的日益提高,如最新的扫描电镜、共焦显微镜等测量仪器已经可以实现纳米级精度的位移测量^[1]。在众多位移测量技术中,光电检测技术以其优异的抗电磁干扰能力和非接触特性脱颖而出,被广泛地应用于工业生产和制造中。

作为光电检测技术的一员,激光三角测距系统基于激光三角原理实现对物体的相对位置(位移)测量^[2-5],具有测量速度快、精度高、非接触、抗电磁干扰能力强、支持在线测量等优势。它既可单独使用,对目标物的位移、弯曲度、振动、表面平整度和纹理等进行测量;也可以 2 台或 3 台组合使用,分别用于进行被测物的厚度检测和目标物的三维定位测量。目前,激光三角位移传感器已经被大量用于机械手臂、点胶机等工业加工和生产设备上,用于提供精准的定位和测量信息。

目前,鉴于激光位移传感器的巨大应用价值和前景,很多国家陆续开展相关的研究且一些国家在此领域已经具有很高的技术水平。其中,美国、日本、德国等传统科技强国已经可以生产出高性能的激光位移传感器。美国 MTI 公司的 LTS 系列传感器,测量范围从 2 mm 到 20 mm,输出频率可达 20 kHz,线性度达 $\pm 0.05\%$ 。日本 Keyence(基恩士)公司的产品是目前应用于工业生产领域中最多的,而且技术水平很高,其 LK 系列传感器根据被测物的粗糙度有宽光点型和聚焦光点型两种可供选择。LK-5000 系列传感器的线性度最高可达 $\pm 0.02\%$,并有着 392 kHz 的采样速率。德国 Micro-Epsilon(米铱)公司的 optoN-CDT2300BL 型传感器利用蓝光波长短的特性,采用蓝色发射激光,可实现对炙热目标物和硅构件的测量。

近年来随着一系列国内顶尖大学的参与研究,我国相关技术水平也取得了显著提高。北京交通大学的冯其波教授比较研究了直入射式和斜入射式两种测距方式^[6]。清华大学利用对称的双光束实现了对运动物体的测量^[7],天津理工大学

等高校也在相关领域开展了深入的研究^[8-9]。上海交通大学的光电检测实验室采用 FPGA 与 DSP 组合使用的方式,搭建了一体式激光三角测距系统^[10],目前该系统在 20 mm 的量程内可实现对目标物的微米级精度测量。但其定位结果有时存在随时间缓慢漂移的现象。针对该现象对系统的采样波形进行观察研究,发现由像差导致的不对称的采样波形会在外界环境变化时,带来定位误差。

针对像差带来的波形不对称问题,本文提出带补偿参数的质心法来定位光斑中心。该方法利用空间建模将理论最小像差成像点结合建立空间虚拟成像系统模型,然后通过光线追迹的方法求出虚拟像素灰度值与实际光敏元件采样灰度值之间的关系,解得补偿参数并通过质心法计算定位光斑中心。与传统的质心法相比,该补偿方法在不损失处理速度的前提下可有效地修正光斑波形,抑制外部环境变化带来的定位误差。

2 激光三角测距原理和传统光斑定位算法

2.1 激光三角测距原理

激光三角测距原理是利用激光的高方向性和高亮度的特性与传统的三角测距法相结合提出

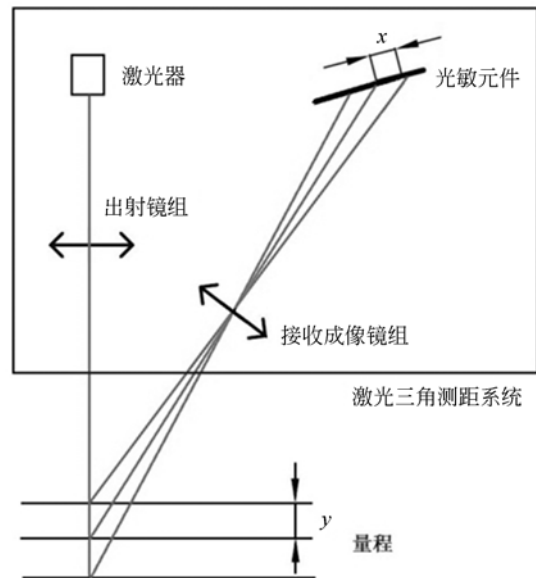


图 1 激光三角测距原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of laser triangulation measurement

的,其基本原理如图 1 所示。激光器发出一束激光照射在被测目标物上,在目标物表面形成漫反射光斑,光斑通过接收镜组成像在光敏元件上。当目标物相对测距系统移动 y 时,光敏元件上光斑像的位置会相应移动 x 。这样,根据定位光敏元件接收到的光斑位置即可得到对应的目标物位置,实现位移测量的目的^[11]。

2.2 传统的光斑定位算法

目前,常用的线阵光敏元件光斑定位算法中,精度可达到亚像素级的有灰度质心法和波形拟合法两种。

2.2.1 灰度质心法

灰度质心法是目前最常用的光斑中心一维定位算法,其基本公式为:

$$P = \frac{\sum_{i=m}^n p_i v_i^k}{\sum_{i=m}^n v_i^k}, \quad (1)$$

$$P = \frac{\sum_{i=m}^n p_i}{m - n + 1}. \quad (2)$$

式中: m 和 n 分别是参与计算像素的左右边界位置, p_i 为第 i 个像素在参与计算时的相对位置, v_i 为第 i 个像素的采样灰度值, k 为灰度值指数。当 $k=1$ 时,式(1)即为通常的灰度质心法;当 $k>1$ 时,灰度值较大的像素点贡献更大,反之 $k<1$ 时,则灰度值较小的像素点贡献更大。特别地,当 $k=0$ 时,表达式如式(2)所示,此时所得结果为 m 与 n 的中点,与采样灰度值无关。而当 k 为 $+\infty$ 时,所得结果即为采样数据中最大灰度值所在的像素位置。

本文采用通常的灰度质心法, $k=1$ 。

2.2.2 波形拟合法

在光斑定位算法中,另一种常用的算法是波形拟合算法。该算法根据采样波形的形状,选取对应的拟合公式对波形进行拟合,然后计算出拟合公式的对称轴坐标作为光斑中心。由于激光光斑的灰度值近似满足式(3)所示的高斯函数分布,所以常用高斯函数对波形进行拟合。但由于高斯函数相对较复杂,拟合用时较长,拟合计算时常简化为二次函数。

$$f(x) = \frac{-(x-b)^2}{2c^2}. \quad (3)$$

波形拟合求光斑中心位置可以有效地减小个

别像素点灰度值的跳动所带来的误差,但是与灰度质心法相比,波形拟合算法更复杂、数据处理速度更慢。处理速度的要求,本文采用灰度质心法对光斑中心进行定位。

2.2.3 波形不对称对质心法定位的影响

对于灰度质心法,波形不对称会引入环境光变化或温度导致的光敏元件暗电流变化等外界环境因素,从而对光斑定位产生不良影响。这种不良影响体现为采样数据波形整体抬高或降低 v_c , 将 v_c 带入式(1) $k=1$ 的情况中进行计算和整理,可得:

$$P_1 = \frac{\sum_{i=m}^n p_i v_i + v_c \sum_{i=m}^n p_i}{\sum_{i=m}^n v_i + v_c (m - n + 1)}, \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{i=m}^n p_i v_i}{\sum_{i=m}^n v_i} = \frac{\sum_{i=m}^n p_i}{m - n + 1}. \quad (5)$$

此时若要 P_1 保持原 P 值不变,则式(5)应成立,对应于灰度质心法中 $k=0$ 的情况,即光斑质心与光斑波形左右边界的中点需重合。当光斑波形的对称性较好时,两位置差距较小,定位误差较小;但是当波形左右对称性较差时,上述环境因素变化就会对光斑定位产生影响,引入额外的误差。

由此可见,灰度质心法会在光斑波形不对称时由于波形整体的上移或下移在定位时引入误差。本文根据造成光斑不对称的原因,通过建立虚拟光敏元件模型对采样波形进行补偿,提高光斑波形的对称性,从而减小环境光波动带来的定位误差。

3 光斑波形修正方法

3.1 光斑不对称原因分析

本文使用的激光三角测距系统的激光接收成像部分如图 2 所示。此部分主要由出射激光束、聚焦透镜组和光敏元件组成。其中,出射激光束所在位置表示本测距系统的量程范围(其为出射激光照射于被测目标物上中心位置的集合),这里将之视为光源。聚焦透镜组将目标物表面的漫反射光汇聚,聚焦于光敏元件位置处。此部分设计满足 Scheimpflug 条件,即为保证量程范围内光敏元件接收的光斑清晰,应有物面、透镜面和像面

所在的三条直线交于一点,如图 3 所示。在本系统中,激光束对应物面,光敏元件对应像面。

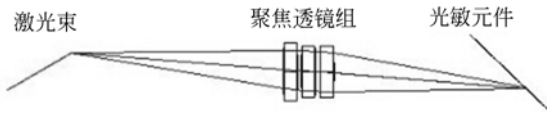


图 2 激光接收成像系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of received laser imaging system

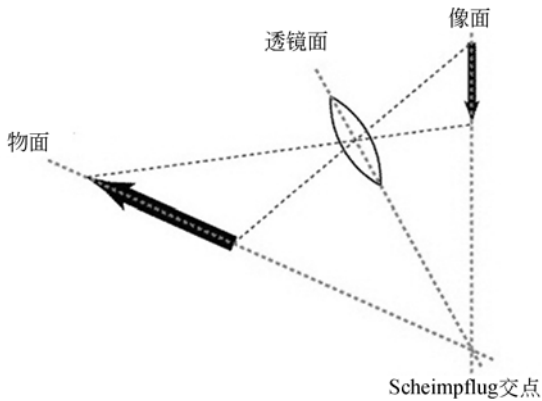


图 3 Scheimpflug 条件示意图

Fig. 3 Diagram of Scheimpflug condition

但在实际系统中,由于激光束不在透镜组主光轴上,因此会在成像时产生球差、彗差等像差。彗差是指光轴外物点经光学系统在像面上成有拖尾的彗星形状的像,其存在直接使所成像不对称。彗差随物点与主光轴距离的增大而变大,所以本

系统在成像时,接近量程两端位置的成像光斑会发生较大的变形。本系统中采用三片透镜组合使用了以缩小入瞳的设计并极大地减小彗差,但光斑不对称的现象依然存在,对测量结果的影响仍然不容忽视。图 4 所示为通过 Zemax 软件仿真得到的当前成像系统在量程两端位置(本文称这两个位置为近光点和远光点)和与光轴交点位置(本文称这个位置为零点)成像光斑的点列图。通过图 4 可以看出,在零点处,光斑点列图的分布对称性好;而在近光点和远光点处,由于彗差的存在,光斑点列图的分布不对称。而系统实际采样的光斑结果也和仿真结果类似,如图 5 所示为经过平滑滤波的实际采集光斑波形,在远光点和近光点处,波形均呈现偏向一侧的形状,且方向相反,这与仿真结果一致。

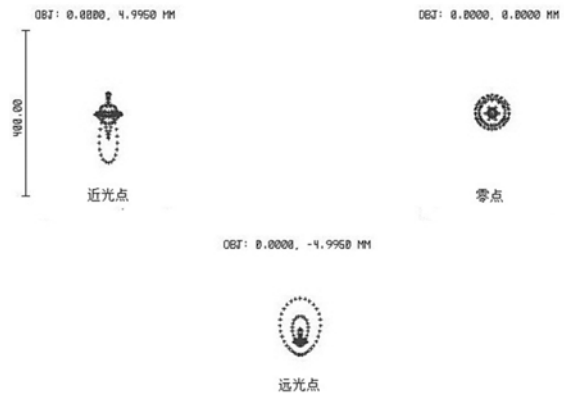


图 4 Zemax 仿真光斑点列图

Fig. 4 Spot diagrams of laser spot

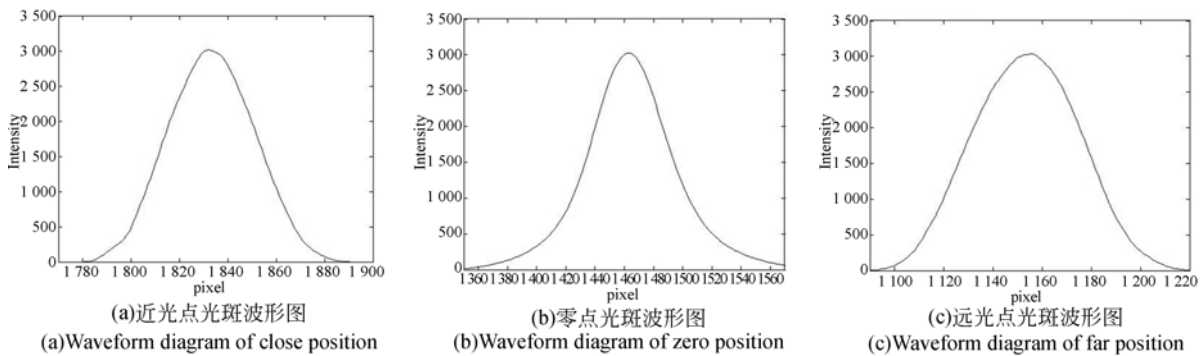


图 5 测距系统的光斑波形图

Fig. 5 Waveform diagrams of received laser spots

3.2 光斑波形修正

对于上述光路系统,非轴上点在成像时不可避免地会产生彗差,于是这里试图寻找最小像差

成像点,利用此类点光斑能量最集中的性质,以减小像差造成的光斑不对称的影响。将成像点相连,即形成一个新的成像平面,本文将之称为虚拟

光学成像系统,然后应用光线追迹和统计学的方法,得到虚拟光学成像系统接收的光强与系统实际光敏元件接收到的光强的关系,并据此得到一组修正系数,对光斑波形进行修正。文中所有坐标值均为同一空间三维坐标系下的坐标值,其中 z 轴为透镜组光轴, x 轴方向为透镜表面竖直方向, y 轴方向为透镜表面水平方向。

3.2.1 虚拟光敏元件获取

在光学成像部分,由像差最小的成像点组成的平面是一个曲面,但由于受到光敏元件感光面为一个平面的硬件条件限制,故在实际系统中只能根据 Scheimpflug 条件寻找一个全量程成像质量相对最优的位置。而虚拟成像系统是本文假设存在的一个光学成像组件,不受空间形状的制约,因此成像在虚拟系统上可以使光斑能量更集中,减小光斑的变形。

为了获取像差最小的成像点,首先利用实际光学组件参数在 Zemax 软件中建立光学模型,然后在全量程 20 mm 的范围进行物点抽样,每隔 0.05 mm 设置一个采样点。通过 Zemax 软件的优化成像功能,可以得到每一个采样点对应的最优成像位置。这些最优成像位置连成的曲线即为虚拟成像系统的位置。

图 6 所示分别为远光点和近光点在最优成像位置的成像光斑点列图。与图 2 相比可见光斑直径小了约一倍,能量更加集中。

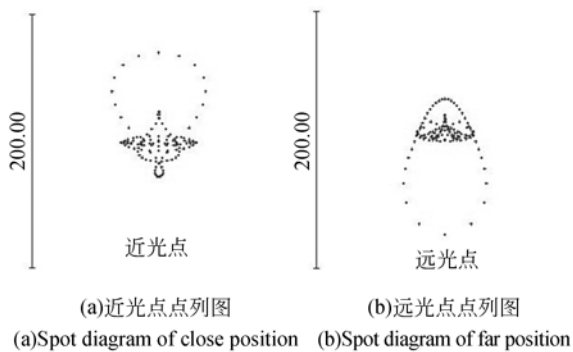


图 6 虚拟成像系统的光斑波形图

Fig. 6 Spot diagrams of received spots in virtual imaging system

图 7 即为求得的空间坐标系内实际光敏元件位置和虚拟成像系统的示意图。由图可见,最优成像位置连成的是一条曲线,而实际光敏元件受

自身硬件条件的约束,位于蓝色线段所在位置。为了去除最优成像位置曲线中的跳变点及方便后续计算,对这条曲线进行 4 次多项式拟合,拟合曲线位置即为虚拟成像系统位置。

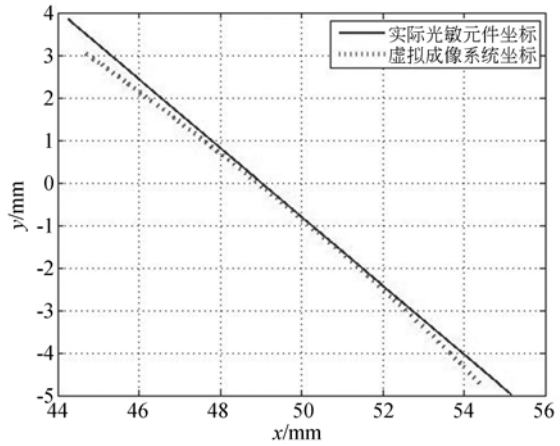


图 7 虚拟光敏元件坐标图

Fig. 7 Location of virtual imaging system

3.2.2 像素光强转换关系

由于实际测距系统只能获得在实际光敏元件处的成像波形,所以需要通过一些方法将实际采样的波形映射至虚拟成像系统上,才能进行后续的质心计算。这里采用精确光线追迹和统计学原理相结合的方式,得到两成像系统间光强的对应关系,进一步求得补偿系数。

精确光线追迹主要利用光在同一介质中沿直线传播的性质和光的折射定律对光线的传播路径进行追踪^[12]。对于每一条需要追迹的光线,已知其起点 (x_i, y_i, z_i) 和方向 (L_i, M_i, N_i) (分别表示光线与 x 轴、 y 轴和 z 轴夹角的余弦),就可以通过联立光线的传播路径公式和介质表面公式求得光线进入下一介质的位置坐标,即有:

$$(x_i, y_i, z_i) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) + t \cdot (L_{i-1}, M_{i-1}, N_{i-1}), \quad (6)$$

$$x_i^2 + y_i^2 + (z_i - z_i)^2 = c_i^2, \quad (7)$$

其中 c_i 表示第 i 个介质表面的曲率。求得交点后,再利用光在不同介质间折射传播的折射定律,即可得到光线在后一种介质中的传播方向,如式(8)所示:

$$\begin{aligned} L_i &= \mu L_{i-1} - \gamma c_i x_i \\ M_i &= \mu M_{i-1} - \gamma c_i y_i \end{aligned}, \quad (8)$$

$$N_i = \mu N_{i-1} - \gamma (c_i z_i - 1)$$

$$\gamma = \sqrt{1 - \mu^2 (1 - \cos^2 I_i)} - \mu \cos I_i. \quad (9)$$

其中: μ 为入射介质与出射介质的折射率比值, $\cos I_i$ 为入射角的余弦值。通过以上公式, 即可在光学系统组件参数确定的情况下, 对指定光线进行精确光线追迹。对一个点光源发出的多条光线进行光线追迹, 可以获得它们通过光学组件后的成像情况。光线的选择方式一般是将入瞳分为 n 个等半径差的圆环, 然后根据式(10)得到选择光线射入点的位置, 其中 r 为光线射入点与入瞳中心的距离, R 为入瞳半径, θ 为光线射入点与入瞳中心连线和 y 轴的夹角, 如图 8 所示。通过上述方法选择的光线分布均匀, 便于进行观察和计算。将光线射入点位置与点光源位置结合, 可求出进行光线追迹所需的人射光线相关参数。在本文中, $n=3$, 即每个点光源追迹 18 条光线。

$$\begin{aligned} r &= \frac{2k-1}{2n}R, k=1, \dots, n \\ \theta &= \frac{(2j-1)\pi}{2(2k-1)}, j=1, \dots, 2k-2 \end{aligned} \quad (10)$$

此外, 在之前的仿真过程中, 将出射激光打在被测物体表面的光斑简化为点光源, 但它实际是一个有一定大小的光强满足高斯分布的光斑。为了使转换模型的结果更精确, 借鉴上述光线的选取办法, 将整个光斑分解为几个光强符合一定条件的点光源的组合。

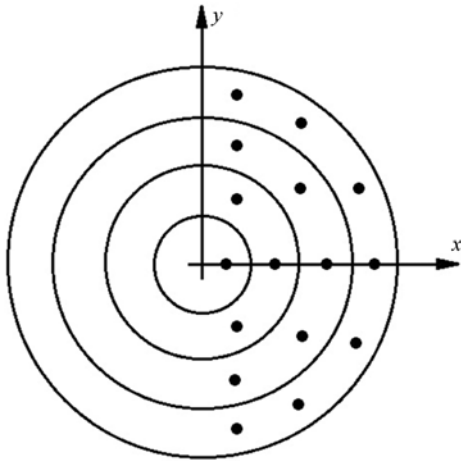


图 8 光线选取示意图

Fig. 8 Scheme of beam chosen

由于高斯分布的波形在 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 内具有 99.7% 的能量, 所以首先检测光斑直径, 并通过近似认为光斑直径等于 6σ 求出 σ 。然后借鉴上述光线抽样的方法进行一次 $n=2$ 的抽样。此时光斑即被分解为均匀分布的内圈 2 个、外圈 6

个点光源的组合。同时为使模型更接近实际情况, 根据高斯分布的性质, 分别对内外圈点光源射出的光线赋予不同权值。对距光斑中心 $\sigma/2$ 处的两个点光源发出的光线赋予 0.342 的权值(高斯分布在 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 内具有 68.4% 的能量, $0.684/2 = 0.342$), 对距光斑中心 $3\sigma/2$ 处的 6 个点光源发出的每条光线赋予 0.045 的权值(高斯分布在 $(\mu-2\sigma, \mu+2\sigma)$ 内具有 95.4% 的能量, $(0.954-0.684)/6 = 0.045$)。这样整个模型建立完毕, 每个光斑的中心位置需追迹 $8 \times 18 = 144$ 条光线。

然后, 根据光线追迹的结果得到虚拟光敏元件和实际光敏元件的接收波形转换关系。具体做法是先对虚拟元件进行等宽度像素细分, 然后在全量程内选取物点位置采用上述模型进行光线追迹。根据光线追迹的结果, 可得到每条光线与实际光敏元件平面和虚拟光敏元件曲面的交点坐标, 由于此坐标一定在某一个像素范围内, 所以每条光线此时会对应一个实际像素和一个虚拟像素。对全部光线进行统计, 并带入光线的权值, 即可获得两种像素光强值的转换关系, 如式(11)所示:

$$V_i = \sum_j \left(\frac{\sum_{k=1}^n d_k v_j}{\sum_{k=1}^N d_k} \right) \quad (11)$$

其中: V_i 表示第 i 个虚拟像素的光强, j 表示每一个与第 i 个虚拟像素有相同对应光线的实际像素的集合, v_j 为每一个实际像素的光强, n 为同时对虚拟像素 i 和实际像素 j 的光线数, N 为对应实际像素 j 的光线数, d_k 为每条光线对应的权值。

对式(11)中的 v_j 进行系数提取, 即可求得当前光源条件下两种像素光强值间的转换关系为:

$$V_i = \sum_j a_{ij} v_j, (\sum_i a_{ij} = 1) \quad (12)$$

其中: a_{ij} 表示虚拟像素 i 对应实际像素 j 的光强系数。由于实际像素尺寸仅为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$, 故同时对特定虚拟像素和实际像素的光线参数相对统一, 所以即使对于不同位置的光源, 转换表达式中的 a_{ij} 也相对固定。对全量程范围内进行光源的抽样及建模计算, 即可获得全量程范围内两种像素光强值的转换系数 a_{ij} 。

3.2.3 处理速度分析

在采用修正后的波形进行质心法光斑定位

时,可得到:

$$P_i = \frac{\sum_{i=m}^n p_i V_i}{\sum_{i=m}^n V_i} = \frac{\sum_{i=m}^n p_i \sum_k a_{ik} v_k}{\sum_{i=m}^n \sum_k a_{ik} v_k}, \quad (13)$$

其中: p_i 为第 i 个虚拟像素位置。由于每个虚拟像素仅会与有限几个实际像素有对应关系,且光斑边缘实际像素的采样光强较小,所以可对式(13)进行近似处理,结果如下:

$$P_i \approx \frac{\sum_k (v_k \sum_i p_i a_{ik})}{\sum_k (v_k \sum_i a_{ik})} = \frac{\sum_k (v_k \sum_i p_i a_{ik})}{\sum_k v_k}. \quad (14)$$

对于同一系统, v_k 对应的 a_{ik} 一致,则上述建模相当于将实际像素 k 对应的位置系数进行了变化,而位置系数在整个系统中保持不变,于是式(14)可以表示为:

$$P_i = \frac{\sum_k p'_k v_k}{\sum_k v_k}. \quad (15)$$

其计算量与传统质心法一致,所以该方法可实现在不改变数据处理速度的前提下,对成像波形进行修正。

4 实验结果分析

应用如图 9 所示的激光测距实验系统对原始算法和修正算法进行误差实验。

首先对修正算法的波形定位重复性误差进行考察。具体实验方法为:采用激光测距系统分别在近光点、零点、远光点 3 个有代表性的位置每隔 30 s 采集一次原始波形,共采集 20 次。之后,对

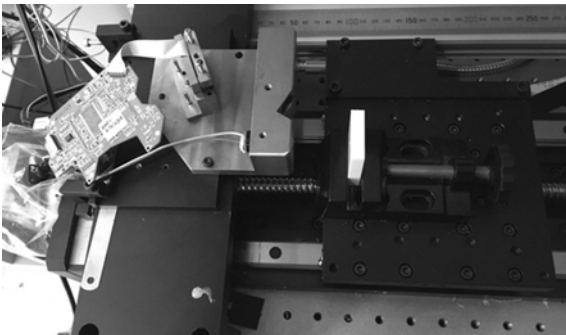
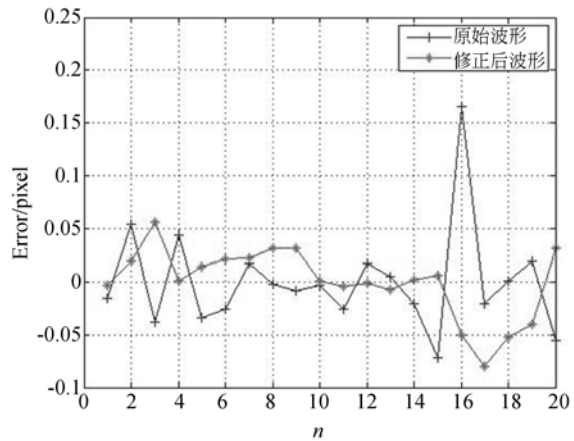


图 9 激光测距实验系统

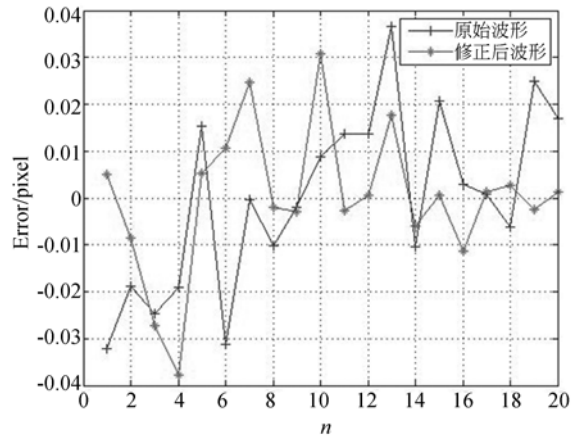
Fig. 9 Laser displacement measuring system

采集的波形分别用传统质心法和修正波形的质心法进行光斑定位计算。将 20 次结果的平均值作为标准结果,每次结果与标准结果的差即为定位重复性误差。

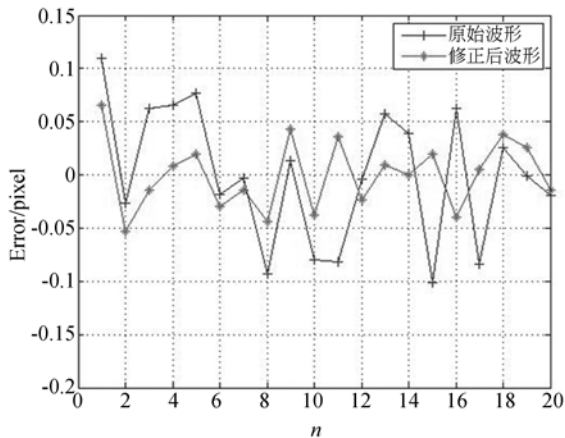
图 10(a)为近光点处波形修正前后的误差曲线。可以发现,在第 16 次测量时,由于外界环境的变化,光斑定位出现了一个比较大的抖动,但与原始方法相比,对此次实验数据波形修正后的光斑定位误差为修正前的 1/2 左右。对于其它实验,两种方法的定位误差相似,修正后略好一些,约为修正前误差的 4/5 左右。图 10(b)所示为零点处波形修正前后的误差曲线,两种方法的定位误差在此位置接近,且均好于近光点、远光点处定位误差。图 10(c)所示为远光点处波形修正前后的定位误差,可以看出波形修正后的重复性误差约为修正前的 1/2 左右。采用修正算法,在 3 个特征位置像素的重复性误差均小于 0.1 个像素,符合亚像素定位的要求。



(a)近光点波形修正前后误差曲线
(a)Location error curve of close position



(b)零点波形修正前后误差曲线
(b)Location error curve of zero position



(c)远光点波形修正前后误差曲线
(c) Location error curve of far position

图 10 波形修正前后误差曲线

Fig. 10 Location error curves before and after compensation

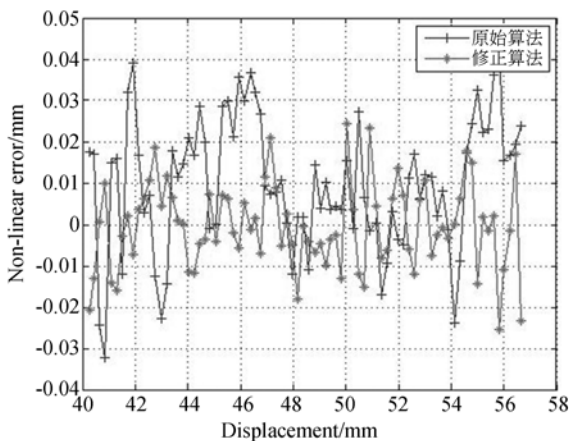


图 11 系统非线性误差曲线

Fig. 11 Non-linear error curves of displacement measuring system

然后对系统整体的非线性误差进行测量。非

线性误差是指对测距系统使用更高精度的标定仪器进行全量程标定后,保持被测目标物不变再次进行测量时测距系统的输出结果与标定仪器结果的误差。非线性误差越小,系统越稳定。在本实验中,采用定位精度为 $1 \mu\text{m}$ 的光栅作为标定仪器。图 11 所示为波形修正前后测距系统全量程的非线性误差结果。可以发现波形修正后环境变化带来的定位误差减小。特别对于一些高误差位置,修正算法可以有效地减小误差幅度,测距系统全量程内的绝对非线性误差为 $\pm 0.025 \text{ mm}$,全量程为 20 mm 时,非线性误差为 $\pm 0.125\%$ 。

5 结 论

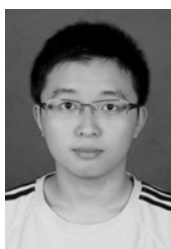
本文解释了激光三角测距系统中成像光斑不对称现象的产生原因,并通过光学系统仿真和实际波形采集验证了波形不对称现象的存在。然后分析了在光斑中心定位值时,波形不对称现象和外界环境变化共同带来的影响。然后利用 Zemax 软件仿真建立了成像像差更小的虚拟成像系统模型,并利用光线追迹的方法及高斯分布中能量分布的特点,建立光斑成像模型,将实际光敏元件接收的波形映射于虚拟成像系统上。根据实际光敏元件和虚拟成像系统间像元的光强转换关系可以得到修正系数并参与最终的质心法计算。与传统质心法相比,该方法可在不改变系统处理速度的前提下,减小环境变化和光斑不对称现象共同带来的定位误差。应用激光三角测距系统对修正前后的波形进行误差实验。实验结果表明,采用该方法可将光斑定位的重复性误差减小至原来的 50% ,测距系统全量程内的非线性误差可达 $\pm 0.125\%$ 。

参考文献:

- [1] 曾毅波, 蒋书森, 黄彩虹, 等. 激光共焦扫描显微镜在微机电系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1241-1246.
ZENG Y B, JIANG SH S, HUANG C H, et al.. Application of laser scanning confocal microscope in micro-electro-mechanical system[J]. Opt. Precision Eng., 2008, 16(7): 1241-1246. (in Chinese)
- [2] FENG J Y, FENG Q B, KUANG C F. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 33-36.
- [3] 陈骥, 王鑫, 曹久大, 等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 611-616.
CHEN J, WANG X, CAO J D, et al.. Development of high-speed CCD laser displacement sensor [J]. Opt. Precision Eng., 2008, 16(4): 611-616. (in Chinese)
- [4] 袁敏杰, 陈骥. 激光位移传感器中线阵 CCD 驱动方

- 法的设计[J]. 电路与系统, 2015, 4: 23-31.
- YUAN M, CHEN J. Design of driving linear CCD in laser displacement sensor[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2015, 4: 23-31. (in Chinese)
- [5] CHEN W, NI Z, HU X, *et al.*. Research on pavement roughness based on the laser triangulation[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(2): 177-180.
- [6] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 33-36.
- FENG J Y, FENG Q B, KUANG C F. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. *J. Applied Optics*, 2004, 25(3): 33-36. (in Chinese)
- [7] ZENG L, YUAN F, SONG D, *et al.*. A two-beam laser triangulation for measuring the position of a moving object[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, 31(6): 445-453.
- [8] 李冬冬, 王永强, 许增朴, 等. 激光三角法在物面倾斜时的测量误差研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2): 28-29.
- LI D D, WANG Y Q, XU Z P, *et al.*. Research on measurement error while workpiece surface is inclining by laser triangulation[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(2): 28-29. (in Chinese)
- [9] 樊玉赢. 激光测距仪光学系统设计及数据处理方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- FAN Y Y. *Optical System Design and Data Processing Methods for Laser Range Finder* [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] 聂晨晨, 张海波, 陶卫, 等. 基于 FPGA 与 DSP 的一体化激光三角位移传感器系统[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(6): 1725-1728.
- NIE CH CH, ZHANG H B, TAO W, *et al.*. Integrative laser triangulation displacement sensor system based on FPGA and DSP [J]. *Computer Measurement & Control*, 2012, 20(6): 1725-1728. (in Chinese)
- [11] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S2): 601-604.
- WANG X J, GAO J, WANG L. Survey on the laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(S2): 601-604. (in Chinese)
- [12] 玄伟佳, 王东光, 邓元勇, 等. 光线追迹法在双折射滤光器误差分析中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 771-777.
- XUAN W J, WANG D G, DENG Y Y, *et al.*. Application of ray tracing method to birefringent filter error analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 771-777. (in Chinese)

作者简介:



张正琦(1992—),男,天津人,硕士研究生,2014年于上海交通大学获得学士学位,主要从事激光三角测距、光斑定位等方面的研究。E-mail: zhang-zhengqi0611@163.com

通讯作者:



赵辉(1965—),男,辽宁人,博士,教授,博士生导师,1986年、1989年和1994年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事传感器、精密测试和图像检测技术等方面的研究。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn