

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107534

激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正*

王成武¹, 陆惠宗², 吴俊杰², 孙爱西¹, 屠明亮³

(1. 浙江师范大学 金华 321004; 2. 浙江工业大学超精密加工研究中心 杭州 310023;

3. 绍兴职业技术学院 浙江 312000)

摘要:基于非接触高测量精度、便于使用等特点,激光三角法测距在科研和工业生产实践中已获得了广泛的应用。位移测量是通过激光斑在成像光敏面上的位移来决定的,在不同的应用中两者之间多项式拟合的参数选择也往往不同,选择合适的多项式,实现快速、高精度测量对不同的应用有很重要的意义。本文针对激光三角法位移测量被测面位移量 y 与成像光斑在光敏面上位移量 x 之间的非线性关系,系统分析了 y 作为 x 的函数用多项式拟合过程中的误差来源,实验搭建了一台小型激光三角位移传感器,根据实验测量数据,验证了搭建的激光三角位移测量装置满足 Scheimflug 条件,根据实验测量值和多项式拟合计算的位移值,定义了一个评判拟合质量的质量因子 Q ,通过计算 Q ,确定了最佳多项式拟合。

关键词:激光三角法测距;测量精度;多项式拟合;误差分析

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement

Wang Chengwu¹, Lu Huihong², Wu Junjie², Sun Aixi¹, Tu Mingliang³

(1. Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Ultra Precision Machine Research Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 3. Shaoxing Vocational & Technical College, Zhejiang 312000, China)

Abstract: Based on the characteristics of non-contact high measurement accuracy and ease of use, laser triangulation distance measurement has been widely used in scientific research and industrial production practice. Displacement measurement is determined from the shift of laser spot on an imaging system's photo sensitive surface. Different application normally requires selection of different polynomial fitting coefficient terms between the two. Proper selection of polynomial terms is very important for realizing high speed and high accuracy in measurement. In this paper, regarding the non-linear relationship between the measured surface displacement y of laser triangulation displacement measurement and the displacement x of the imaging spot on the photosensitive surface, systematically analyzed the error sources due to polynomial fitting of y as a function of x . A miniature laser triangulation displacement sensor were built, Based on the experimental measurement data, it is verified that the laser triangle displacement measurement device satisfies the Scheimflug condition. According to the experimental measurement values and the displacement values calculated by polynomial fitting, a quality factor Q is defined to judge the quality of the fitting, and the optimal number of polynomial terms is determined by calculating the Q factor.

Keywords: laser triangulation distance measurement; measurement accuracy; polynomial fitting; error analysis

0 引 言

随着工业制造的进步,对制造过程中精密测量提出了更高的要求,作为一种非接触式、高精密度测量方法,光

学测量已开始在生产领域中获得了越来越广泛的应用,特别是在一些大型器件,如大型轴承等工件的精密测量方面,由于工件安装、移动等方面的限制,需要基于非接触式的精密光学测量方法。这方面已有不少探索和尝试^[1-4],基于激光三角法测量微小位移的光学测量方法近

收稿日期:2021-02-24 Received Date: 2021-02-24

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2000403)、浙江省自然科学基金(LY18E050021)项目资助

年来在厚度测量、位移测量、圆度测量、振动测量等方面已有大量应用^[5-11]。这种测量方法的精度一般可以达到微米量级,且使用简单,非常适合于工业在线测量和检测^[12-14],但其测量精度受多种因素的制约^[15-17],除了被测表面的特征对测量精度的影响外,拟合参数的选择也对测量精度有很大的影响。由于在这种测量方法中,被测表面的位移量 y 与光敏面上的光斑中心的移动量 x 之间的关系是非线性的,在实际应用中,根据光斑中心在光敏面上的移动量 x ,测出被测面的移动量 y ,两者之间的数学关系由成像光路的几何参数和光学参数确定。而一般实际应用中为了提高检测速度,采用多项式拟合方法,多项式拟合是一种近似,对于较小的量程,实验证明,采用线性拟合也能获得较高的测量精度,但对于稍微大一点的范围,线性拟合引入的误差较大,且随着量程的增加而增大,二次多项式拟合就可将测量误差大幅降低^[15],但对于覆盖位移传感器光敏面全范围的测量,则需要用更多次项的多项式拟合,多项式拟合中所选项数越多,拟合效果越好,但同时也增加了实际应用中的计算量。在提高激光三角法测距的精度方面,也有通过参量优化和算法优化方法的尝试^[18-20],但这些方法都牵扯到复杂的数学运算,计算成本高,很难应用到实际的传感器上。本文通过实验搭建了一个基于激光三角法的测量光路,为获得高精度的位移测量,采用了一个线阵 2 496 pixel 的 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 相机芯片,芯片像素沿测量方向 (x 方向的像素宽度为 $5.5 \mu\text{m}$),并开发了一个基于 DSP (digital signal processor) 构架的芯片像素读出电路,被测面的位移通过 CMOS 相机光敏面上光斑的质心位置确定。根据实验结果,分析了激光三角位移传感器在全量程范围内,根据 Scheimpflug 条件建立的被测面与光敏面位移关系之间的误差及多项式拟合与实际测量值的误差,给出了多项式拟合的最佳项数。

1 激光三角法测距原理

激光三角法测距的原理是基于这样一个事实:当一束聚焦激光照射到被测表面上时,在被测表面上会生成一个激光光斑,此时,在与激光束成一个夹角的方向可将该光斑成像到一个相机上,如图 1(a)所示。

图中成像光轴与激光束光轴成一个角度 α ,被测表面沿激光束方向的不同位置生成的光斑在相机上生成相应的像,通过测量相机上所成像的位置,即可测量被测表面在激光束方向的距离,如图 1(b)所示。像的位置一般通过确定成像光斑的质心位置来定,当被测表面对激光光斑形成均匀散射时,在相机的像面上生成的像的光强

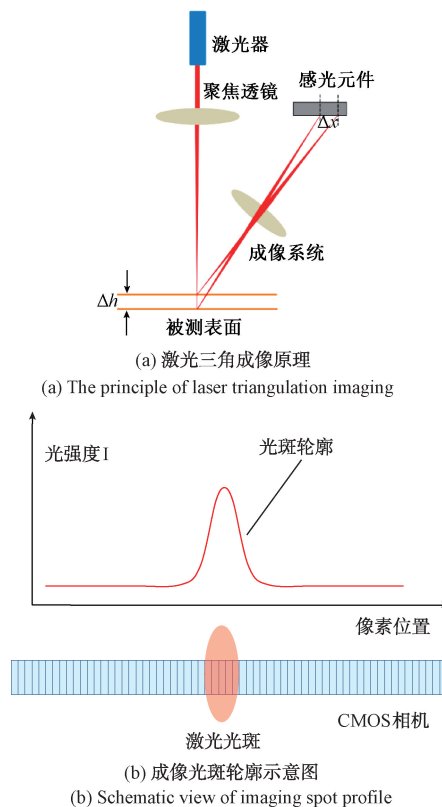


图 1 激光三角法测距原理

Fig. 1 The principle of laser triangulation distance measurement

分布与入射到被测表面上的激光束光强分布相似,质心位置对应激光光斑的中心位置。

激光器发出的准直光源经柱面镜聚焦后在 O 点形成一个长条形的光斑,激光器光轴与成像透镜光轴之间的夹角为 α ,从被测表面的 O 点到成像透镜的距离为 a_0 ,成像光学系统的光轴与 CMOS 光敏面的夹角为 β 。被测面上 O 点处的光斑在 CMOS 光敏面上的 O' 点处成像,如果光斑在被测面上沿图中的被测面方向的光强分布满足高斯分布,则在 CMOS 光敏面上所成光斑的光强分布由于光学成像本身带来的像差,其沿光敏面方向的强度分布会偏离高斯分布,因此一般在确定光斑中心位置时不用高斯拟合,而采用质心算法^[19-20]。

这个光学系统满足 Scheimpflug 条件^[17], CMOS 光敏面的延长线,激光光轴,和成像透镜线相交于一点。各参数之间的几何关系如图 2 所示。

由 Scheimpflug 条件,可得:

$$a_0 \tan \alpha = b_0 \tan \beta \quad (1)$$

由此可得:

$$y = \frac{a_0 x \sin \beta}{b_0 \sin \alpha - x \sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

由式(2)可知, x 与 y 之间的关系是非线性的,因此

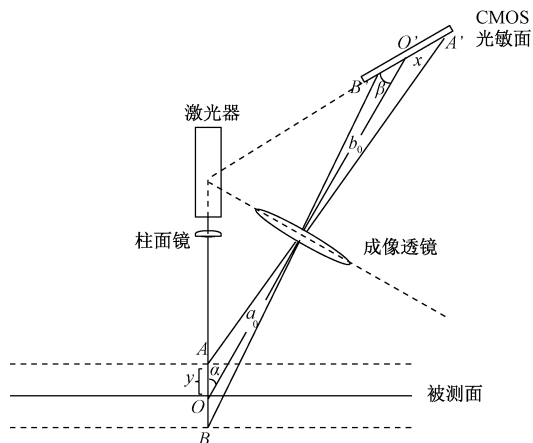


图 2 激光三角法测距光路

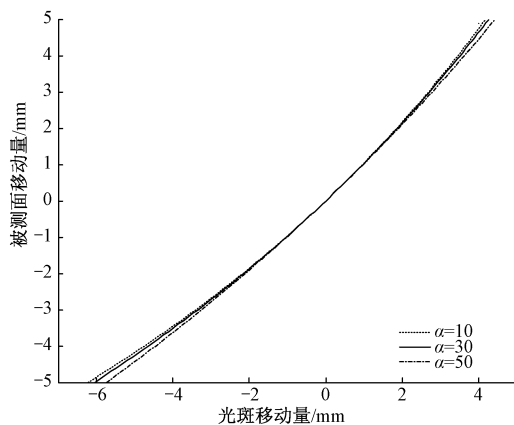
Fig. 2 Optical path of laser triangulation distance measurement

所测量到的 CMOS 光敏面上的光斑位移必须用一组参数,非线性地拟合出被测面的位移量,当然,如果被测面的位移量非常小,两者之间的关系可以被近视看作线性的^[14]。激光三角法测距应用中,为获得最大的量程,一般会将测量范围覆盖整个光敏面的有效像素,因此必须考虑被测面位移量与光斑位移量之间的非线性关系。由式(2)可知,方程中有 4 个参数,但根据式(1),只有 3 个独立参数,在确定了 α, β 角度,及 a_0, b_0 的距离后,式(2)可改写成:

$$y = \frac{Ax}{B - Cx} \quad (3)$$

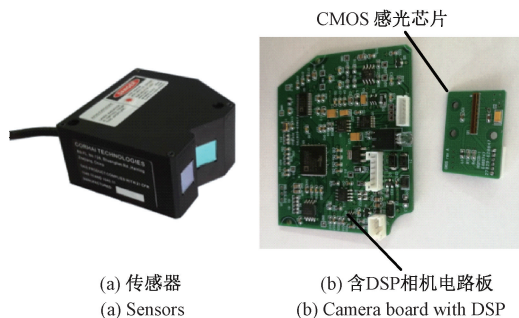
这里, $A = a_0 \sin \beta, B = b_0 \sin \alpha, C = \sin(\alpha + \beta)$, 都为常数。从式(3)可知,只要 3 个独立的参数就可以将光敏面上的光斑位移量转换成被测的移动距离。图 3 是在 $a_0 = 50 \text{ mm}, b_0 = 50 \text{ mm}, \alpha$ 角分别等于 $10^\circ, 30^\circ$ 和 50° 时 x 与 y 之间的关系。

由图 3 可知,根据 Scheimflug 关系得到的 x 与 y 的关系受 α 角的影响很小,但在设计这种位移传感器时,必须考虑另外两个很重要的因素:1)有效工作距离;2)CMOS 光敏面法线与成像光轴夹角。有效工作距离越大,越适合于应用,但工作距离的增大将使得成像距离也相应增大,从而使得整个传感器体积增大,另外,如不相应增加成像透镜的口径,则光通量也将随距离的平方下降,使信噪比下降;另一方面,减小 α 角可使整个传感器的体积缩小,但将增大 CMOS 光敏面法线与成像光轴的夹角,夹角过大造成光斑畸变和光强减小,导致测量误差增加,因此实际应用中,常选择一个合适的 α 夹角,如 30° 角左右以兼顾两者。

图 3 α 角等于 $10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ 时被测面位移量与光斑在 CMOS 光敏面上位移量的关系Fig. 3 The relationship between the displacement of the measured surface and the displacement of the spot on the CMOS photosensitive surface when α is equal to $10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$

2 实验描述和数据分析

实验中的光源来自一个波长 650 nm , 功率 5 mW , 光束直径 1 mm 的准直激光器, 光束经一个焦距为 50 mm 的柱面透镜聚焦, 柱面镜的聚焦面在激光光轴和成像光轴构成的面内, 被测面为一个表面镀有有机涂料, 且对反射和散射各向同性, 粗糙度为 $4.12 \mu\text{m}$ (粗糙度由科海光电科技有限公司提供的白光干涉仪测得), 在被测面上聚焦处的光斑为一椭圆形, 长轴为 1 mm , 短轴为 $40 \mu\text{m}$ (光强 e^{-1} 处宽度), 该光斑经成像透镜后在 CMOS 的光敏面上成像, 激光光轴与成像光轴的夹角为 30° , CMOS 光敏面与成像光轴的夹角也为 30° , 在实验装置中, $a_0 = 43.5 \text{ mm}, b_0 = 53 \text{ mm}$ 。自制的线阵相机采用了一个 2496 pixel 的 CMOS 相机芯片 (滨松: S13434), 芯片像素沿测量方向 (x 方向的像素宽度为 $5.5 \mu\text{m}$), 并开发了一个基于 DSP 构架的芯片像素读出电路, 为了使整个激光三角位移测量装置的结构更加紧凑, 该电路由两部分组成, 第 1 部分主要安装有 CMOS 感光芯片, 如图 4 所示; 第 2 部分主要有 DSP 芯片 (ADI 的



(a) 传感器 (a) Sensors (b) 含 DSP 相机电路板 (b) Camera board with DSP

图 4 激光三角位移传感器

Fig. 4 Laser triangulation displacement sensor



ADSP-DF702)及ADC(Analog-to-Digital Converter)芯片,将CMOS上信号经AD转换后进行运算,图4为用于本次实验的激光位移传感器及相机电路板。

实验装置如图5所示。

CMOS光敏面中心对应最佳聚焦位置。当被测物远离传感器时,物距变大,像距变小,反之,物距变小,像距变大,满足式(2)。当被测面不在最佳聚焦位置时,物方光斑和像方光斑都偏离成像系统的光轴,因此所成的像会有一些的像差。被测面安装在一个电动平台上,电动平台可沿激光束方向运动,电动平台的位置由光栅尺读出,光栅尺分辨率为 $1\ \mu\text{m}$,重复精度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。被测样品为一块表面镀有有机涂层的金属板。表1是被测表面在 $\pm 5\ \text{mm}$ 范围移动所对应的CMOS像素值。

图6为根据表1实验数据和式(3)理论计算画出的

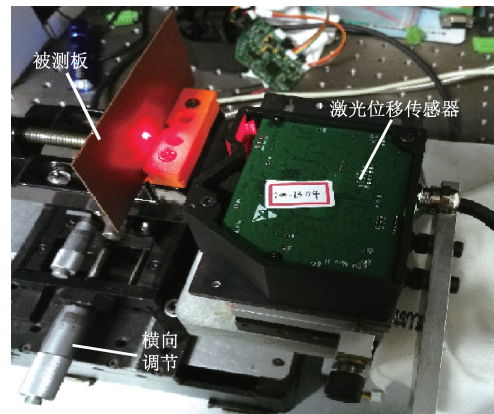


图5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

表1 被测表面沿激光轴位移量与对应的成像光斑在CMOS光敏面上的像素值

Table 1 The surface displacement value along the laser axis corresponding to the pixel value of the image spot on the CMOS photosensitive surface

序	位移/ μm	像素	序	位移/ μm	像素	序	位移/ μm	像素	序	位移/ μm	像素
1	-4 902	-1 078.258	26	-2 421	-483.126	51	81	14.650	76	2 591	436.242
2	-4 803	-1 052.229	27	-2 322	-461.935	52	182	32.782	77	2 693	452.094
3	-4 705	-1 026.973	28	-2 221	-439.768	53	282	50.919	78	2 793	467.610
4	-4 605	-1 000.832	29	-2 119	-417.725	54	382	68.934	79	2 893	482.763
5	-4 505	-974.940	30	-2 019	-396.606	55	480	86.378	80	2 994	498.138
6	-4 406	-949.784	31	-1 919	-375.646	56	579	104.080	81	3 094	513.010
7	-4 308	-925.283	32	-1 816	-354.222	57	678	121.644	82	3 194	527.916
8	-4 207	-900.164	33	-1 712	-333.251	58	776	138.622	83	3 291	542.510
9	-4 109	-875.737	34	-1 610	-312.417	59	875	155.778	84	3 392	557.327
10	-4 012	-851.491	35	-1 508	-291.765	60	975	173.216	85	3 492	571.810
11	-3 916	-827.406	36	-1 405	-270.708	61	1 076	190.397	86	3 590	586.193
12	-3 816	-803.243	37	-1 304	-250.395	62	1 176	207.299	87	3 684	600.319
13	-3 716	-779.199	38	-1 204	-230.330	63	1 274	223.703	88	3 785	614.822
14	-3 619	-756.021	39	-1 105	-210.905	64	1 376	240.902	89	3 884	629.146
15	-3 522	-733.396	40	-1 004	-190.950	65	1 477	257.673	90	3 981	643.008
16	-3 422	-709.947	41	-904	-171.346	66	1 577	274.404	91	4 080	656.889
17	-3 323	-686.614	42	-804	-152.134	67	1 678	290.958	92	4 181	671.076
18	-3 224	-663.522	43	-706	-133.352	68	1 779	307.580	93	4 280	685.101
19	-3 125	-640.747	44	-605	-114.066	69	1 879	323.901	94	4 378	698.991
20	-3 024	-617.454	45	-506	-95.124	70	1 979	339.864	95	4 476	712.611
21	-2 924	-594.687	46	-408	-76.690	71	2 079	355.777	96	4 575	726.320
22	-2 824	-572.148	47	-314	-58.601	72	2 181	372.207	97	4 675	740.133
23	-2 725	-550.141	48	-211	-39.674	73	2 283	388.598	98	4 774	754.010
24	-2 623	-527.491	49	-113	-21.212	74	2 385	404.470	99	4 873	767.564
25	-2 521	-504.835	50	-16	-3.067	75	2 485	420.157	100	4 974	781.359

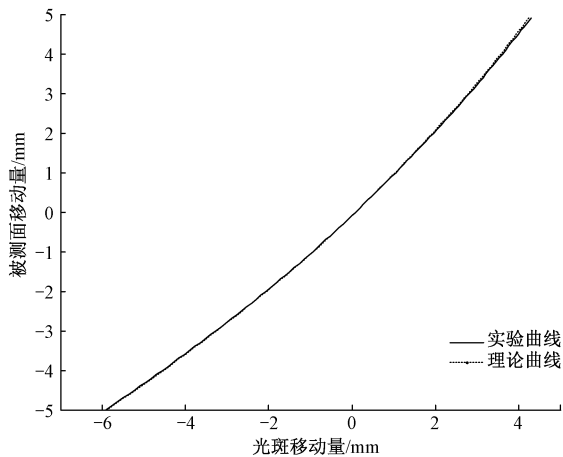


图6 实验曲线与理论计算曲线

Fig. 6 The experimental curve and the theoretical curve

曲线,式(3)中的参数 A, B, C 根据实验装置参数中的 a_0, b_0, α 计算得到。

$$A = a_0 \sin(\beta) = 21.75, B = b_0 \sin(\alpha) = 26.5,$$

$$C = \sin(\alpha + \beta) = 0.866$$

由图6可知实验曲线与理论计算曲线几乎完全重合,只是在曲线的两端,略有偏差。如果将光斑位移量的实验值与理论值差值的平方根定义为质量评价因子 Q ,则有:

$$Q = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x_E(y_i) - x_T(y_i)]^2}}{N} \quad (4)$$

根据式(5)计算的 $Q = 2.311 \mu\text{m}$,其中 $N = 100$ 。

实际应用中,会利用多项式拟合建立被测面位移量与光斑在感光面上位移量之间的关系,也即本文中 y 与 x 之间的关系。式(3)可按多项式展开:

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n + \dots \quad (5)$$

式(5)是根据 y 与 x 之间的理论关系展开的,实际应用中,光斑在感光面上的零点位置一般会取在感光器件的中心,因此,上式中会引入一个常数因子 a_0 。

式(5)可重新表为:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n + \dots \quad (6)$$

式(6)中所选多项式越多, y 与 x 之间的关系就越接近理论曲线,但实际应用中,所选项越多,计算量越大,会影响传感器的测量速度,因此希望在保证测量精度的情况下,用最少的多项式来建立 y 和 x 之间的关系,质量评价因子 Q 可帮助我们找到最佳选项。

式(3)中有3个独立的系数, A, B 和 C ,加上一般选用感光器件的中心作为零点而引入的一个常数项,总共有4个独立的系数,因此,要建立 y 和 x 之间的多项式关系,至少需要4个独立系数。当然,在测量范围较小的情况下,线性拟合(2个独立系数)或者二次拟合(3个独立参数)也可获得很好的测量精度。对于较大的测量范围,需要采用至

少4个独立系数来建立 y 和 x 的多项式关系。

表2是实验数据在不同的多项式拟合下其评价质量因子 Q 值。

表2 多项式拟合对应的评价质量因子 Q Table 2 The polynomial fitting corresponds to the evaluation quality factor Q

多项式	线性项	二次项	三次项	四次项
$Q/\mu\text{m}$	26.012	2.349	0.283	0.183
多项式	五次项	六次项	七次项	八次项
$Q/\mu\text{m}$	0.156	0.134	0.124	0.122

表2列出了从线性拟合到八次项多项式拟合下的评价指标 Q ,随着多项式项数增加, Q 值呈递减趋势,在七次项后, Q 值变化已达纳米级,保持在 $0.1 \mu\text{m}$ 量级,继续增加多项式项数已不再能明显提高测量精度,因此对于这个实验装置,七次多项式拟合足够了。

图7是线性拟合、二次拟合、三次拟合和四次拟合下,理论计算的光斑位移量与实验测量到的位移量之间的误差。由图可见,误差随着多项式拟合次数的增加而明显减小。

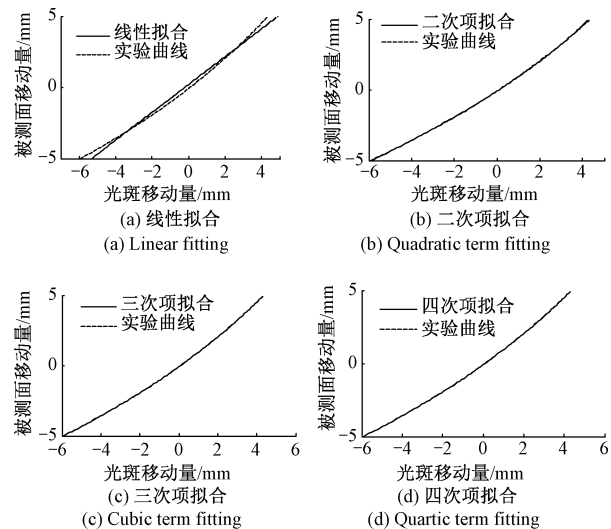


图7 多项式拟合与实验测量值之间的误差

Fig. 7 Error between the polynomial fit and the experimental measurements

另外,由表2并对照实验与理论计算的 $Q = 2.311$ 可见,理论计算与实验数据之间的拟合比二次多项式拟合略好,但较三次多项式拟合差,原因是在式(4)中,假定了 A, B, C 3个参数都可以根据实验精确测量,实际情况下,这几个参数各自与根据实验测量的 a_0, b_0, α 计算所得到的值有误差,如果在这3个参数中都各自加1个常量:



$$A \rightarrow A + A_0$$

$$B \rightarrow B + B_0$$

$$C \rightarrow C + C_0$$

则式(4)最终可改写成:

$$y = \frac{(A_1 + A_2)x}{(B_1 + B_2) - Cx} \quad (7)$$

其中,

$$A_1 = \frac{AC_0}{C + C_0}, \quad A_2 = \frac{A_0C}{C + C_0}$$

$$B_1 = \frac{BC}{C + C_0}, \quad B_2 = \frac{B_0C}{C + C_0}$$

改写后的式(7)总共有5个独立参数。因此用1个五次多项式拟合是合适的。

如果将图7中曲线左下段区域放大,可明显看到误差随多项式项数增加而减小。

注意,图8(a)~(d)中x和y坐标轴的比例。

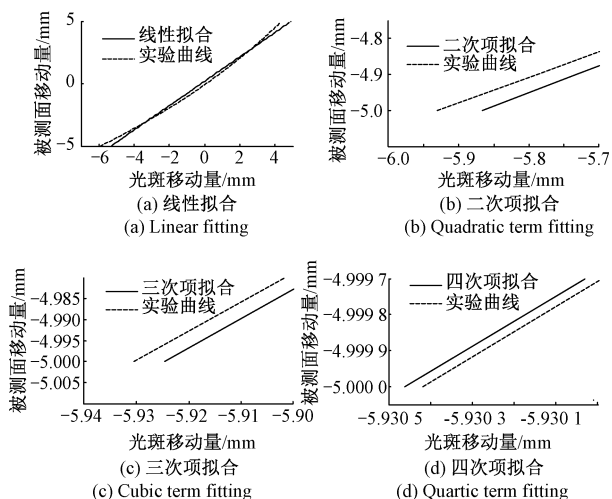


图8 局部区域多项式拟合误差

Fig. 8 Polynomial fitting error in local view

根据式(3),考虑到CMOS像素的零点取值以及光路参数测量的误差,五个独立系数的多项式应该可以很好地建立被测面位移量与光斑在CMOS光敏面上的位移对应关系,实际应用中,由于CMOS光敏面上所成的像会有一些的像差,因此在考虑式(6)的多项式时,可以在5个独立系数外,再增加1~2个独立系数,用来修正由于像差产生的拟合误差。图9是用ZEMAX模拟的一个焦距25mm的成像系统,在等效于被测面移动±5mm范围内,一个标准的点光源所成像的追迹点阵图,由图9可见,在最佳聚焦位置,也即被测面位移为零处,所成的像是一个圆,且直径最小,偏离聚焦位置越远,像差越大。而根据Scheimflug方程式得到的被测面位移量与CMOS

光敏面上光斑位移量之间的关系是建立在光斑的光强分布不随位置移动而改变的基础上的,像差引起的光强分布畸变会使CMOS光敏面上光斑位移量偏离由Scheimflug方程式决定的被测面位移量,因此仅根据Scheimflug方程式采用5个独立系数来建立被测面位移量与光斑位移量之间的关系将产生误差,需要增加至少1~2个独立参数,如用多项式拟合的方法,可采用七次项多项式拟合。本文实验中采用了七次项拟合标定激光三角位移传感器,为验证七次项拟合后的传感器测量精度,对一块台阶高度标定为8.414 μm的标准块(VLSI标准台阶)进行测量,由于标准块表面类似镜面,所以采用反射式测量方法,将传感器光束的入射角设定在15°,如图10所示。测量值为8.6 μm,考虑到15°入射角,需乘一个cos15°的修正因子,修正后的高度值为8.3 μm,与标定的8.414 μm相差小于0.2 μm,因此该传感器的测量不确定度远小于±1 μm。

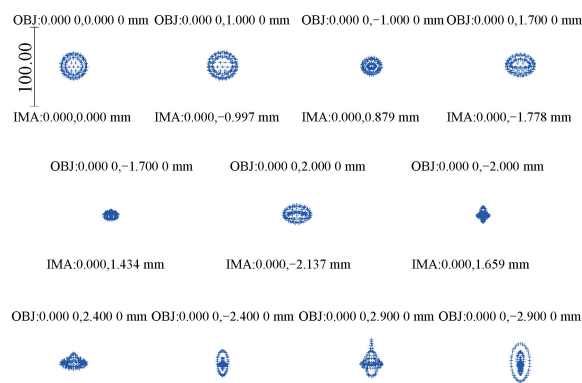


图9 点光源经位移传感器成像系统后在CMOS成像面上的追迹点阵

Fig. 9 The ray trace spot diagram of a point light source on the CMOS image surface after passing through the displacement sensor's imaging system

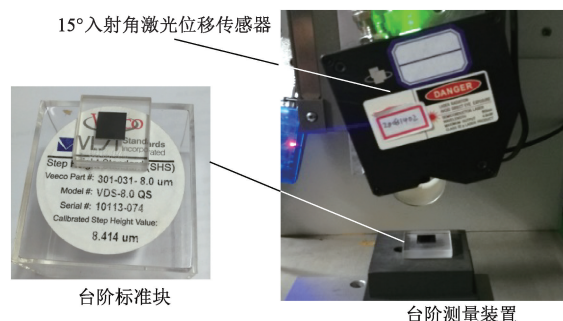


图10 台阶标准块和台阶测量装置

Fig. 10 Step height standard and the step height measurement setup



3 结 论

激光三角法测距在满足 Scheimflug 条件时,理论上在获得了光路的几何和光学参数 a_0, b_0 , 和夹角 α 后,可完全建立被测面位移量与光斑在光敏面上位移量之间的关系,但在实际应用中,由于光路几何参数的测定存在一定误差,及光敏面像素零点位置与被测面零点位置之间的误差,需要至少 5 个独立系数来确立被测面位移量与光敏面上光斑位移直接的对应关系,考虑到光斑的光强分布在被测面的不同位置处由于畸变会发生变化,因此需要在多项式拟合中增加 1~2 个独立系数。本文从激光三角法测距原理出发,搭建了一个满足 Scheimflug 条件的光学测量装置,根据实验测量结果及理论计算,采用多项式拟合法定标,分析了多项式拟合与测量误差之间的关系。

实验中对一个表面涂有有机涂料的,各向均匀的金属板材的位移量进行了测量,用测量得到的数据,进行了线性,二次,一直到多项式的八次方拟合,并定义了一个质量评价指标 Q ,评价指标 Q 显示,所用的多项式次数越高,拟合效果越好,从线性拟合到多项式的三次拟合, Q 改善很快,随着多项式项数的增加, Q 值改善速度放缓,增加到七次多项式后, Q 值几乎不再变化,因此对于这种激光三角位移传感器,在选定的光路几何和光学参数下,选用七次多项式的拟合参数标定该传感器可保证测量精度。

参考文献

- [1] 史尧臣,周宏,唐武生,等. 基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数测量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 138-145.
SHI Y CH, ZHOU H, TANG W SH, et al. Profile parameters measurement of automotive synchronous belt based on laser triangulation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 138-145.
- [2] 孙兴伟,张静,王可,等. 基于激光三角法的螺纹型面信息采集技术研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(23): 80-82.
SUN X W, ZHANG J, WANG K, et al. Study of thread profile information collection technology based on laser triangle principle [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(23): 80-82.
- [3] 张丰收,吴国新,都兴兴,等. 大型轴承测量中基于机器视觉的光笔测量系统[J]. 轴承, 2012(12): 53-56.
ZHANG F SH, WU G X, DU X X, et al. Light pen detection system based on machine vision in large size bearing measurement[J]. Bearing, 2012(12): 53-56.
- [4] 宋丽梅,覃名翠,杨燕罡,等. 激光视觉方法用于检测齿轮加工误差[J]. 光电工程, 2015, 42(1): 1-5.
SONG L M, QIN M C, YANG Y G, et al. Gear machining error detection based on laser vision method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(1): 1-5.
- [5] 张慧,宋晓波,张帅军,等. 大型轮廓测量仪[J]. 轴承, 2017(9): 59-62.
ZHANG H, SONG X B, ZHANG SH J, et al. Large-scale profile measuring instrument [J]. Bearing, 2017(9): 59-62.
- [6] 訾豪,彭云,储月刚,等. 基于激光位移传感器的蜗轮蜗杆精密测量[J]. 机械传动, 2019, 43(5): 84-90.
ZI H, PENG Y, CHU Y G, et al. Precise measurement of worm and worm gear based on laser displacement sensor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(5): 84-90.
- [7] 王正家,盛文婷,解家月,等. 基于线性激光三角法的圆柱对象定位测量研究[J]. 激光技术, 2019, 43(4): 464-470.
WANG ZH J, SHENG W T, XIE J Y, et al. Research of locating measurement of cylindrical objects based on linear laser triangulation[J]. Laser Technology, 2019, 43(4): 464-470.
- [8] SOAVE E, D'ELIA G, MUCCHI E. A laser triangulation sensor for vibrational structural analysis and diagnostics[J]. Measurement and Control, 2020, 53(1-2): 73-82.
- [9] 陆惠宗,屠明亮,纪晨东,等. 激光聚焦偏移测量微小位移方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 461-466.
LU H Z, TU M L, JI CH D, et al. Micro displacement measurement method based on laser focus deviation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 461-466.
- [10] LU H Z, WANG Z W, DENG Q F, et al. A study on fast geometric form measurement of high precision balls[J]. Advanced Material Research, 2014, 1017: 669-674.
- [11] LU H Z, WANG Z W, JI C D, et al. A study of ultra-precision ball rotating displacement measurement using laser focus deviation probes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(14): 2504-2510.
- [12] LID, WANG B, TONG Z, et al. On-machine surface measurement and applications for ultra-precision machining: A state-of-the-art review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1-4): 831-847.



- [13] YUAN L, GUO T, QIU Z J, et al. Measurement of geometrical parameters of cutting tool based on focus variation technology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105 (5-6): 2383-2391.
- [14] 赵娜, 赵娟, 朱亚晓, 等. 激光三角法测距的误差因素分析[J]. 科技通报, 2018, 34(2): 183-187.
ZHAO N, ZHAO J, ZHU Y X, et al. Analysis of error factors on laser triangulation measurement [J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(2): 183-187.
- [15] 蔡逸, 刘常杰. 激光三角法测距传感器的参数优化[J]. 传感技术学报, 2017, 30(10): 1472-1477.
CAI Y, LIU CH J. Parameters optimization of laser range sensor based on triangulation [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(10): 1472-1477.
- [16] 孙军利, 赵辉, 陶卫. 具有亚像素级定位精度的激光三角测距新算法[J]. 激光杂志, 2006, 27(4): 22-23.
SUN J L, ZHAO H, TAO W. A new algorithm for precision laser triangulation measurement [J]. Laser Journal, 2006, 27(4): 22-23.
- [17] 赵景海, 孙飞显. 基于残差补偿的激光位移传感器测距方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(10): 298-302.
ZHAO J H, SUN F X. Laser displacement sensor measurement method based on residual compensation [J]. Computer Engineering, 2018, 44(10): 298-302.
- [18] 梁俊元, 游林儒, 文小琴, 等. 改进的 Sage-Husa 算法在提高激光位移传感器精度中的应用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 115-119.
LIANG J Y, YOU L R, WEN X Q, et al. Application of improved Sage-Husa algorithm in improving laser displacement sensor accuracy [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(31): 115-119.
- [19] 王晓蒙, 王会峰, 姚乃夫. 基于粒子群算法的激光位移传感器参量优化 [J]. 激光技术, 2018, 42(2): 181-186.
WANG X M, WANG H F, YAO N F. Parameter optimization of laser displacement sensor based on particle swarm optimization algorithm [J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 181-186.
- [20] 刘立波, 赵辉, 张海波, 等. 激光三角测距中光斑细分定位方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(10): 1396-1398.

LIU L B, ZHAO H, ZHANG H B, et al. Research on spot subdivided locating method in laser triangulation measurement [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(10): 1396-1398.

作者简介



王成武, 分别在 2009 年、2012 年于浙江工业大学获得工学学士和硕士结业证书, 2016 年于日本九州大学获得博士学位, 现为浙江师范大学工学院讲师, 主要研究方向为超精密加工技术与装备、微纳加工技术。

E-mail: cwuwang@126.com

Wang Chengwu received his Bachelor degree and his graduate diploma from Zhejiang University of Technology in 2009 and 2012 respectively. He received his Doctorate degree from Kyushu University in 2016, He is currently a lecturer in College of Engineering, Zhejiang Normal University. His main research fields are ultra-precision processing technology and equipment, and micro-nano processing technology.



陆惠宗 (通信作者), 分别在 1982 年、1985 年于复旦大学物理系获得理学学士和硕士学位, 2000 年于佛罗里达大西洋大学物理系获得博士学位, 现为浙江工业大学超精密加工研究中心兼职教授, 主要研究方向为工业在线精密检测和测量技术及装备。

E-mail: huizong.lu@corhai.com

Lu Huizong received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from the Physics Department of Fudan University in 1982 and 1985 respectively. He received his Ph. D. degree from the Physics department of Florida Atlantic University in 2000, He is currently an adjunct professor at the Ultra Precision Machine Research Center of Zhejiang University of Technology. His main research interest is in the area of precision inspection and measurement technologies and instruments for in-situ manufacturing applications.



屠明亮, 1982 年于复旦大学物理系获得学士学位, 现为绍兴职业技术学院副教授, 主要研究方向为精密光学测量及应用。

E-mail: tml1962@163.com

Tu Mingliang received his B. S. from the Physics Department of Fudan University in 1982. He is currently an associate professor at Shaoxing Vocational & Technical College. His main research interest is in the area of optical measurement and its applications.