

线结构光扫描测头误差分析与补偿方法

丁建军, 蒋庄德, 李兵, 郭俊杰, 陈磊

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对线结构光扫描测头多项式拟合测量模型的系统误差问题, 提出了一套用于该测头系统误差提取与补偿的方法. 该方法通过在不同高度测量固定直线来提取不同景深位置的测量误差, 并从中分离出测头在不同测量高度存在的系统误差, 同时进行高度方向上的误差补偿. 然后, 利用标定结果以及高度方向的误差补偿点阵, 将由标定成像网格点阵计算得到的空间点阵与实际标定空间网格点阵进行对比, 进一步提取高度误差补偿后的测量结果存在的误差值, 从而进行二次补偿与修正. 实验表明, 该方法可以有效扩大测量景深(达到 150 mm), 并且在采用步进电机开环驱动的普通机械精度工作台(单轴定位精度为 15 μm)上测量时, 能够保证在较大景深范围内具有较好的测量精度($\pm 50 \mu\text{m}$).

关键词: 线结构光; 多项式拟合; 误差分析; 误差补偿; 景深

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0286-05

Error Analysis and Compensation of Linear Structured Light Scanning Probes

DING Jianjun, JIANG Zhuangde, LI Bing, GUO Junjie, CHEN Lei

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For polynomial fitting measuring model of a linear structured light scanning probe, the extraction and compensation methods for systematic errors of the probe are presented. By measuring fixed lines at different height, the proposed method extracts the measuring errors in positions with different depth of the field. And systematic errors of the probe at different measuring height are separated from the extracted errors, and the first error compensation in the height direction can be implemented. According to the calibrating result and error compensation lattice in the height direction, a comparison is made between the spatial lattice obtained by calibrating image grid lattice and the practical calibrating spatial grid lattice. The remaining errors of measuring results after compensation in the height direction are further extracted. And the second error compensation and correction are implemented simultaneously. The experimental results show that the measuring depth of field can be expanded effectively and reached 150 mm with the presented method. A high accuracy ($\pm 50 \mu\text{m}$) can be ensured in a large range of depth of field on common mechanical accuracy platforms (single axis positioning accuracy: 15 μm) driven by step motor with open-loop style.

Keywords: linear structured light; polynomial fitting; error analysis; error compensation; depth of field

在利用基于三角原理的线结构光三维轮廓测量系统进行测量时, 由于在被测高度方向上, 实际高度

与成像变化之间是非线性关系, 只有较小一段范围可近似认为是线性的, 因此可测景深较小^[1-2]. 由实

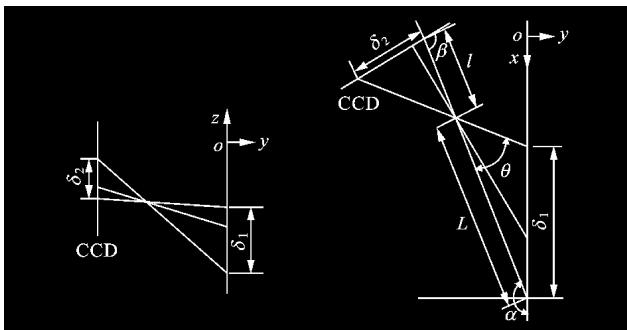
验表明,网格点多项式拟合标定精度随测量景深的不同而发生变化,为了保证测量结果在测量景深范围内具有较好的线性,一般对整个系统结构的安装调试有非常高的要求.对于景深问题,有文献提出通过仿形测量来解决^[3-4],但仍然无法消除测量过程中的非线性误差,并且对于面型复杂的曲面轮廓仿形很难达到较好的效果.为了减少测量过程中上述非线性对测量景深的影响,进一步提高快速轮廓的测量精度,本文从分析线结构光扫描测头存在的系统误差入手,提出了线结构光三维扫描测头系统的误差提取与补偿修正的原理和方法.

1 测量基本原理分析

基于线结构光的三维轮廓测量方法采用光学三角法原理,半导体激光器经柱面镜投射出一个光平面,并与被测空间物体相交形成激光投射曲线.由于受到物体高度变化的影响,通过 CCD(Charge Coupled Device)从与投射方向不同的另一方向观察到的该投射曲线的形状与位置包含了被测物体表面的高度信息,利用该信息就可实现高度测量^[5].

如图 1 所示,分析理想情况下线结构光轮廓扫描测头的成像模型,设激光投射平面为 zox 平面,激光投射方向为 x 方向(即被测高度方向), y 轴垂直于激光投射平面,坐标系为右手坐标系.由于 CCD 成像平面与激光投射平面都垂直于 xoy 平面,因此在 $yo z$ 投影平面内,像三角和物三角的对应边成比例关系(见图 1a).在 xoy 投影平面内,被测点在 x 方向的 δ_1 与 δ_2 可通过图 1b 描述出来.

根据三角关系,得 xoy 投影平面内各相关参数的关系如下



(a) $yo z$ 平面投影

(b) xoy 平面投影

δ_1 :空间位移; δ_2 :像位移; α, β :测试起始位置物像连线分别与激光投射平面和 CCD 成像平面的夹角; θ :测试起始位置与当前被测位置物像连线的夹角;
 L, l :测试起始位置的物距与像距

图 1 线结构光轮廓扫描测头的几何成像原理图

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta_1}{\sin \theta} &= \frac{L}{\sin(\alpha - \theta)} \\ \frac{\delta_2}{\sin \theta} &= \frac{l}{\sin(\beta - \theta)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

并进一步推出 xoy 投影平面内 δ_1 与 δ_2 的关系为

$$1/\delta_2 = (lL \sin \beta / \delta_1 l \sin \alpha) + (\text{ctg} \alpha - \text{ctg} \beta) \sin \beta / l \quad (2)$$

即 δ_1 的倒数与 δ_2 的倒数存在着线性关系.

2 轮廓测量系统的标定方法及误差分析

2.1 基于多项式拟合的网格标定原理

为了建立 CCD 成像点坐标与空间点坐标之间的对应关系,需要对测量系统进行标定,标定结果可以用来近似地描述成像坐标与空间坐标之间的映射关系^[6].

本文采用直射法三角测量原理,在 CCD 的测量范围内,空间任意一点皆会对应成像到 CCD 像平面的一点上.按照图 1 所示的坐标系,选取被测空间 zox 平面内已知距离的特征点构成特殊网格点阵,用 CCD 进行采集,采集结果在 CCD 成像面上对应的形成成像网格点阵.采用网格点阵多项式拟合法近似求解空间点阵与成像点阵之间的映射函数,该方法计算简便,同时还可以减小 CCD 镜头畸变等因素对测量结果的影响^[7].本文采用的网格点阵多项式拟合公式为

$$\left. \begin{aligned} X(u, v) &= \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^{n-j} C_{ij} u^i v^j \\ Z(u, v) &= \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^{n-j} D_{ij} u^i v^j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: u, v 是图像坐标; C_{ij}, D_{ij} 是拟合系数.

2.2 网格点多项式拟合标定误差分析

按照式(3),如果希望多项式拟合标定结果具有较好的测量精度,则系统的可测景深范围非常有限,而在大景深范围内,理想值和多项式拟合值存在着较大的误差,因此难以保证测量的精度.本文通过工作台的运动来实现空间网格点的测量,并建立起一组像坐标与空间坐标的对应标定网格点阵(5×7),具体数据见表 1.

利用表 1 所列数据,按照网格点阵式(3)建立多项式映射函数,然后利用所得标定结果反求出标定成像网格点所对应的空间网格点的坐标值(见表 2),表 1、表 2 中具有相同序号的点为对应点.

从表 1 和表 2 中的对比计算,可以看出基于网

表1 标定生成的一组对应图像与空间的网格点阵

序号	u	v	x	z	序号	u	v	x	z	序号	u	v	x	z
1	502	482	-70	28	13	459	431	-60	36	25	357	306	-40	52
2	460	492	-60	28	14	501	424	-70	36	26	411	305	-50	52
3	413	501	-50	28	15	500	366	-70	44	27	457	308	-60	52
4	360	512	-40	28	16	458	370	-60	44	28	500	308	-70	52
5	301	523	-30	28	17	411	372	-50	44	29	499	249	-70	60
6	234	539	-20	28	18	358	375	-40	44	30	456	247	-60	60
7	159	555	-10	28	19	299	378	-30	44	31	409	242	-50	60
8	158	472	-10	36	20	232	384	-20	44	32	356	238	-40	60
9	233	462	-20	36	21	158	388	-10	44	33	297	232	-30	60
10	300	452	-30	36	22	158	304	-10	52	34	231	229	-20	60
11	359	443	-40	36	23	232	305	-20	52	35	156	222	-10	60
12	412	435	-50	36	24	298	305	-30	52					

表2 根据标定结果反算出的对应空间网格点阵

序号	x	z	序号	x	z	序号	x	z
1	-69.976 87	28.082 93	13	-60.055 56	35.903 65	25	-39.910 17	51.989 95
2	-60.040 23	27.863 15	14	-69.967 47	36.105 35	26	-50.181 50	52.214 56
3	-50.020 92	27.947 53	15	-69.901 16	44.042 63	27	-59.951 38	51.906 37
4	-39.933 91	27.964 68	16	-60.006 92	43.849 99	28	-70.071 40	51.959 55
5	-29.994 04	28.150 87	17	-50.016 60	43.948 02	29	-70.034 63	60.064 85
6	-20.001 44	27.970 34	18	-39.945 30	43.994 45	30	-59.938 38	59.887 97
7	-10.004 31	27.984 28	19	-29.992 28	44.071 62	31	-49.991 08	60.043 35
8	-9.993 33	36.024 94	20	-19.960 24	43.901 21	32	-39.946 95	59.977 23
9	-20.031 11	35.965 57	21	-9.994 89	44.009 03	33	-30.010 76	60.107 63
10	-30.033 00	35.978 09	22	-10.020 85	52.051 87	34	-20.099 18	59.856 45
11	-39.977 85	35.979 82	23	-20.042 37	51.949 39	35	-9.941 99	60.035 16
12	-50.058 48	36.191 67	24	-29.953 13	52.025 87			

格点阵多项式拟合的标定方法在原理上所存在的误差,计算表明,表2中35组对应点的平均距离偏差为0.088 mm.

2.3 其他系统的误差分析

网格标定原理的分析是建立在理想的成像条件之下,在实际的测量过程中,由于受光学三角成像原理的局限,以及CCD和相关光学器件制造工艺的限制,景物对象与CCD摄像机三维空间相对位置的关系、光学镜头畸变、成像光轴与成像平面间存在的垂直度误差和图像采集卡性能等因素的影响,会使得空间点在成像平面上的实际成像位置与理想位置不一致,即系统产生了几何失真或几何畸变,这些都将导致测量系统出现误差.

3 测量系统误差补偿原理与方法

3.1 测量误差的提取

本文借助标定板来确定测量系统在不同测量景深位置的测量误差状况,在测量景深(150 mm)的范围内,以1 mm为测头测量高度的调整步距,进行了151次测量(测量结果只记录测头测量值),将测量结果与标准值进行比较,得到了测量误差.图2是对 x 方向(即高度方向)误差的提取结果,沿箭头所指方向测头测量高度不断增加,在与测量高度和扫描线扩展都垂直的方向上反映的是所提取的误差值的大小.在理想条件下,线结构光在空间形成的激光平面与标定板平面相交成一条直线,而151次的测量

结果在 CCD 成像面上形成 151 组直线,理论上这 151 组直线的测量结果互相平行且间距为 1 mm。

由于前文已分析了各项误差的存在,因此这 151 组直线不是完全平行,间距也不完全相同,而且直线度的差别较大。



图2 不同测量高度的直线测量误差提取结果图像

3.2 系统误差补偿与修正

3.2.1 测量高度方向的误差提取与修正 首先,需要通过滤波去噪方法去除测量结果中存在的随机误差,由 2.2 节的分析可知,在一定范围内多项式拟合可以保证较高的精度.本文在研究中使用平面精度较高的标定板,同时采用相对坐标进行测量,因此在无法确认固定放置标定板具体方向位置时,可以选取 151 组直线中在 x 方向直线度最好的一组作为误差补偿与修正的基准,即默认此直线为所测误差最小的直线

$$x_0 = kz_0 + b_0 \quad (4)$$

式中: k 为 151 组直线的斜率; b_0 为直线截距.通过基准直线平移得到其余直线的表达式为

$$x_i = kz_i + b_0 + b_i \quad (5)$$

式中: b_i 是第 i 条直线相对基准直线在 x 方向的相对移动量。

通过式(5)求得 151 组直线的精确表达式,同时与各直线的实际测量结果进行比较,可以求得在各个景深位置的系统误差,进行插值处理后,还可以得到景深范围内任意测量位置(x 方向)的系统误差值.将误差值加入到测量结果中,可以提高测量系统的测量精度,具体实现的流程如图 3 所示。

3.2.2 系统误差的二次补偿与修正 图 4 是在经过 x 方向系统误差补偿修正后,在一个标准平面内对拉直导线的平移扫描测量结果,平移步距为 1 mm,导线摆放方向与 y 方向大致平行,测量过程中测头在 z 方向上有一个位移.由图 4 可以看出,在高度方向进行补偿后, x 方向上的直线度得到了很好的提高,而在 z 方向上却存在相对较大的误差。

如果使系统在测量范围内有较高的测量精度,就必须在对 x 方向补偿的基础上对测量结果进行二次补偿和修正(见图 5)。

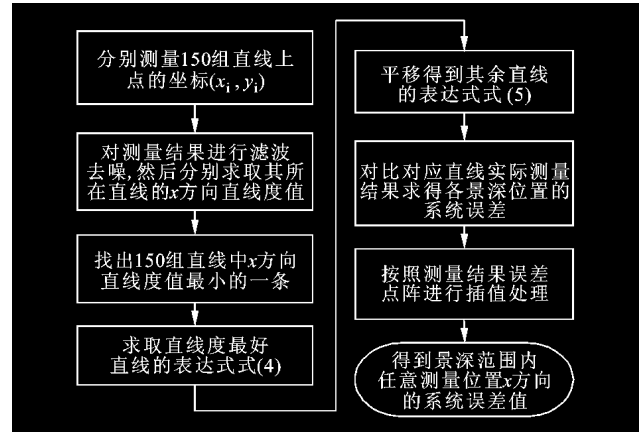


图3 x 方向系统误差补偿算法的示意图

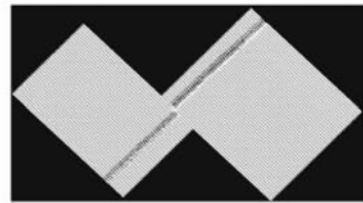


图4 测头在 z 方向的测量误差示意图

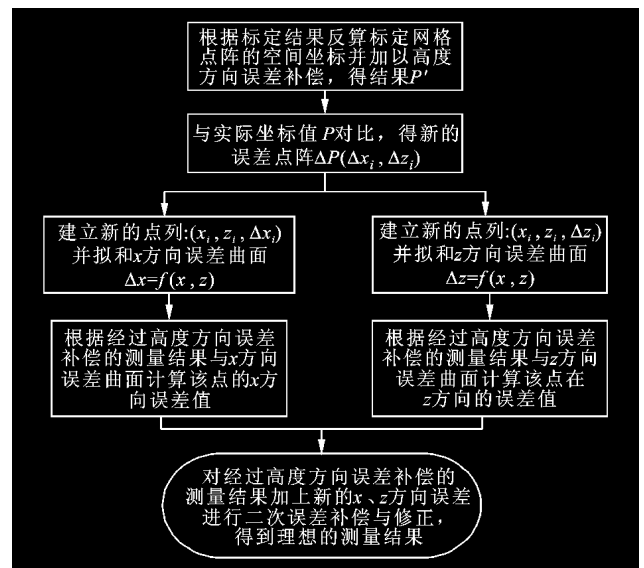
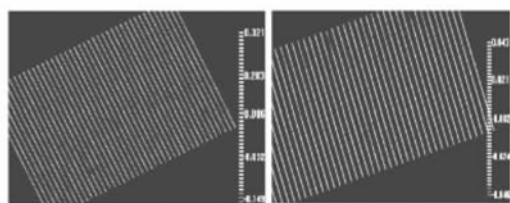


图5 x, z 方向系统误差二次补偿算法框图

4 实验结果分析

应用本文所描述的线结构光扫描测头误差补偿方法,在单轴定位精度为 $15 \mu\text{m}$ 的步进电机开环驱动控制的工作台上,对一个标准平面(平面度小于 $5 \mu\text{m}$)进行平面度的测量.由于平面度误差值可以反映测头测量误差的情况,因此可以评价测头误差补偿与修正的效果.图 6 的对比实验表明,该方法可明显提高三维轮廓的测量精度(达到 $\pm 50 \mu\text{m}$),其

测量结果更为可靠。



(a)补偿前 (b)补偿后
图6 标准平面测量结果的对照分析

对一个复杂的人头雕塑的面部曲面进行三维轮廓数据的快速提取,此头像的轮廓范围为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,并且面部的轮廓细节形状复杂,因此需要测量的景深范围较大(见图7)。

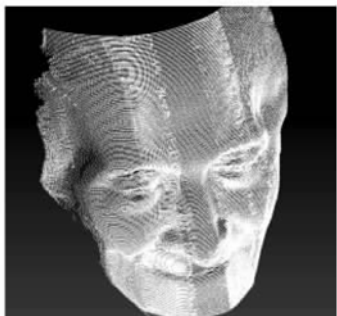


图7 雕塑面部表面轮廓补偿测量结果(平面扫描)

从图7中可以看出,加以误差补偿后的测量结果可在较大的测量景深范围(高度方向 150 mm ,单线激光有效测量长度为 $55\sim 80\text{ mm}$)内保证较高的三维轮廓测量精度,面部的各个细节得到了完整准确的重现。因此,加以误差补偿后的测量能够更好地满足高精度三维轮廓的测量要求。

5 结 论

基于线结构光的三维轮廓扫描测头,由于受到标定原理与系统硬件设备条件的限制,以及测量景深的变化等因素的影响,因此在测量过程中存在着较大的误差。本文根据光学三角测量原理,在测量高度方向上对系统的测量误差进行标定,并将该误差值补偿到实际测量结果中,实现了第1次误差补偿。借助标定点阵以及高度方向的误差补偿,计算标定图像网格点阵对应的空间点阵,同时与实际标定空

间网格点阵进行对比,进一步提取进行高度误差补偿后测量结果在 x 和 z 方向的误差值,并进行第2次补偿与修正。本文方法可以在较大测量景深的范围内,保证系统具有较高的测量精度,从而更好地实现了对产品三维轮廓的快速提取。由于景深问题的解决,降低了设备在安装调整方面的要求,因此在实际应用中提高了设备的可操作性。

参考文献:

- [1] 周利民,胡德洲,卢秉恒. 激光扫描三角法测量精度因素的分析与研究[J]. 计量学报, 1998, 19(2): 52-57.
ZHOU Limin, HU Dezhou, LU Bingheng. A study of the precision factors of the laser scanning triangulation method [J]. ACTA METROLOGICA SINICA, 1998, 19(2): 52-57.
- [2] 李晶,吴章江. 基于图像处理的激光双三角法测量三维曲面[J]. 激光与红外, 2001, 31(2): 87-89.
LI Jing, WU Zhangjiang. Laser double triangulation method measurement for 3D surface based on image processing [J]. Laser and Infrared, 2001, 31(2): 52-57.
- [3] 施进发,孙建华,宗思生,等. 大型曲面形状激光自动测量技术研究[J]. 中国机械工程, 2001, 12(8): 28-30.
SHI Jinfa, SUN Jianhua, ZONG Sisheng, et al. Research on auto-measuring technology by laser for large-scale curved surface shapes [J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(8): 28-30.
- [4] 隋连升. 高精度三维轮廓测量系统数据处理与精度分析[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2003.
- [5] 金涛,童水光. 逆向工程技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [6] TSAI T H, FAN K C, MOU J I. A variable-resolution optical profile measurement system [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(2): 190-197.
- [7] LI Bing, JIANG Zhuangde, LUO Yiping. Measurement of three-dimensional profiles with multi structure linear lighting [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003, 19(6): 493-499.

(编辑 管咏梅)