

文章编号 1004-924X(2011)09-2036-07

CCD 分段测量的光学位移测量系统

李雅倩*, 付献斌, 周 坤

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为了高精度地实现大量程的位移测量,采用传统激光三角法的测量原理,提出一种基于虚拟探测器的激光三角法来测量位移。该方法基于3个CCD分段测量的思想,将3个CCD互相独立且沿光轴均匀分布,以此扩大传统方法测量的范围。使用平面反射镜作为虚拟探测器进行探测,当成像光束经平面镜反射后在CCD上成像时,系统相当于增加了一个CCD,扩展了测量量程。由准直系统、偏振片、光阑组成准直滤光系统,缩小探测器光敏面上像点的直径,减小被测表面非理想光点对测量精度的影响,从而实现了较高精度下的大位移测量。最后通过实验验证了方法的可行性。

关键词:激光三角法;CCD;虚拟探测器;位移测量

中图分类号:TH822;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2036

Optical displacement measuring system by CCD segmental measurement

LI Ya-qian*, FU Xian-bin, ZHOU Kun

(*Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yaqian.li@ysu.edu.cn*

Abstract: To realize the large-scale and high-precision displacement measurement, a new method based on a virtual detector was described according to the basic principles of traditional laser triangulation method. The CCD subsection measurement was used to enlarge the measuring range and to implement the displacement measurement. Three independent CCDs were distributed uniformly along the optical axis and a plain reflected mirror was regarded as the virtual detector. When the beam image was reflected by the plane mirror, the beam was imaged by CCDs. The designed system is equivalent to that a CCD is added, therefore, the measuring range is enlarged. Furthermore, the collimator filter is composed of a collimation system, a polarizer and a diaphragm. It shortens the diameter of the image spots on the photosensitive surface of the detector, and reduces the influent of unideal optical spots on the measured surface on the measuring accuracy. The high-precision measurement of large displacement is achieved. The results are in agreement with the experimental observation.

Key words: laser triangulation method; CCD; virtual detector; displacement measurement

$$k = \Delta d f_1^2 / (a f_2) = 42 \mu\text{m}. \quad (11)$$

所以测量 600~1 200 mm 的长度理论分辨率也能达到 42 μm 。

同理,第三种情况,当 f_1 不变, $f_2 = 850$ mm, $a = 75$ mm 时,计算量程为:

$$z_1 = d f_1^2 / (a f_2) = 600 \text{ mm}, \quad (12)$$

理论分辨率为:

$$k = \Delta d f_1^2 / (a f_2) = 42 \mu\text{m}. \quad (13)$$

所以测量 1 200~1 800 mm 的长度理论分辨率也能达到 42 μm 。

具体光路设计如图 2 所示, P_1, P_2 和 P_3 分别表示上述 3 种情况, 3 种情况下设计光路选用的 f_1 均为 600 mm。由于 3 个测量范围的参数 a 和 f_2 不同, 所以透镜 L_1, L_2, L_3 在图中位置并不是相同的, 为了将以上 3 种情况在一个图中清楚表示, 所以只画出其中的一个位置, 其他透镜均在 L_0 焦点垂线上下移动即可。 P_1, P_2 和 P_3 分别成像在 $\text{CCD}_1, \text{CCD}_2$ 和 CCD_3 。

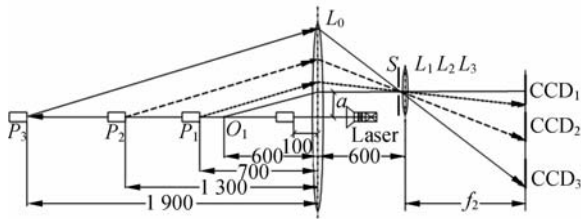


图 2 量程为 0~600, 600~1 200 和 1 200~1 800 mm 的测量系统

Fig. 2 Measuring scale in range of 0-600, 600-1 200 and 1 200-1 800 mm

由于 3 种情况的 f_1 均为 600 mm, 所以可以共用 L_0 , 将 3 种情况下的会聚透镜分布在同一平面上, L_1, L_2, L_3 分别相差 120° , 如图 3 所示。因为 3 种情况下测量系统的理论分辨率都相同, 所以选用的 f_2, a 能够使 3 种情况下的系统组合成

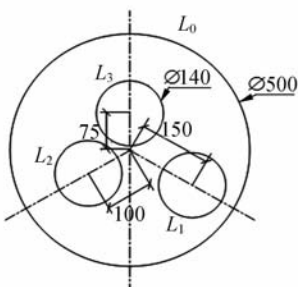


图 3 会聚透镜 L_1, L_2, L_3 分布图

Fig. 3 Distributing map of convergent lens L_1, L_2, L_3

一个量程为 0~1 800 mm 的新系统, 理论分辨率为 42 μm , 并且互不影响, 这样就扩大了光学三角法的测量范围。

3 准直滤光系统设计

激光器发出的是方向性较好、发散角较小和光束较细的高斯光束, 实际测量时, 为了精简测量机构减低设备成本, 选择工作距离等于光腰距离的激光器可以省去聚焦准直透镜。激光器发出光束虽然很细, 但仍存在发散并具有一定的直径, 所以不加处理的光腰距离不能满足较大尺寸测量的精度要求。如果被测表面上的光点不理想, 探测器光敏面上会形成一个小光斑, 成像点较大, 从而影响测量精度和量程, 所以必须进行准直和聚集处理, 尽可能缩小激光束在探测器光面上的成像点直径。

准直滤光系统由光阑、准直系统和偏振片组成, 系统中采用组合透镜法, 设计出两组三片式透镜准直系统, 如图 4 所示。为了获得直径更小的光斑, 在激光器前方安装两个光阑滤除杂光, 减小光斑的直径。光阑选用大恒新纪元生产的最大孔径为 12 mm 最小孔径为 1 mm 的 GCM-5702M 型可变光阑。为了滤除由第一级光阑引起的次级衍射光斑, 可将第一级光阑的孔径调为 1 mm, 第二级略大于第一级。在入射和出射光路中分别安装两个偏振方向相反的偏振片, 消除被测物表面反射光的影响。偏振片也选用大恒新纪元生产的 GCM0901 型偏振片, 该偏振片的端面有 3600 个角度刻线, 便于光学元件调整角度。

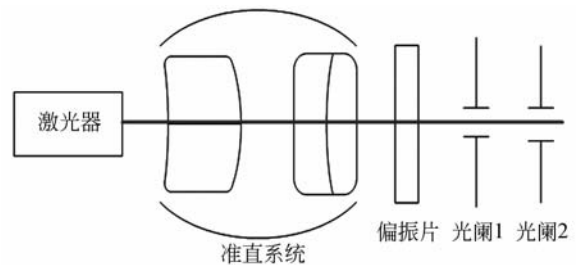


图 4 准直滤光系统

Fig. 4 Collimation filter system

4 基于虚拟探测器扩展 CCD 尺寸

目前,在光学三角测量中,决定测量范围的一个重要因素就是探测器的尺寸。在一定的精度的要求下可以通过延长 CCD 尺寸来扩大量程。本文设计的系统通过平面反射镜 M 作为虚拟探测器来实现。平面反射镜位于 CCD_1 的一端并垂直于像平面,如图 5 所示。在被测物体由远处移至近处的过程中,成像光束达到探测器时探测器的像元数开始是增大的,但经平面镜反射第二次到达探测器时,像元数是减小的,这样一束光信号被系统两次接收,系统相当于增加了一个探测器,从而使系统的测量范围得到扩展。同一个像点因平面反射镜的存在对应两个不同的物点,通过像点的峰值光强大小可以区分开来,由于光线经过平面反射镜的传播距离远,所以光线经过平面反射镜小于对应的未经反射镜的像点光强。

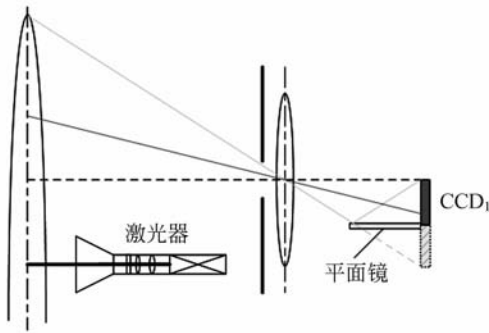


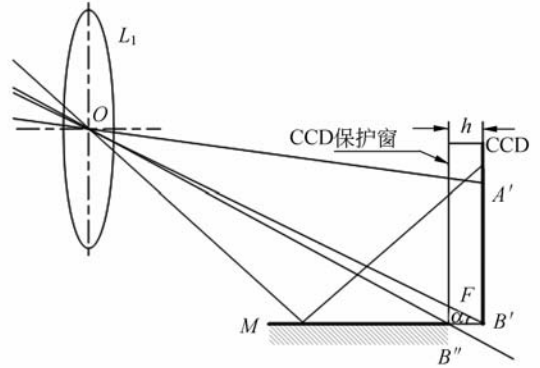
图 5 延长探测器尺寸的示意图

Fig. 5 Diagram of extending size of fictitious detector

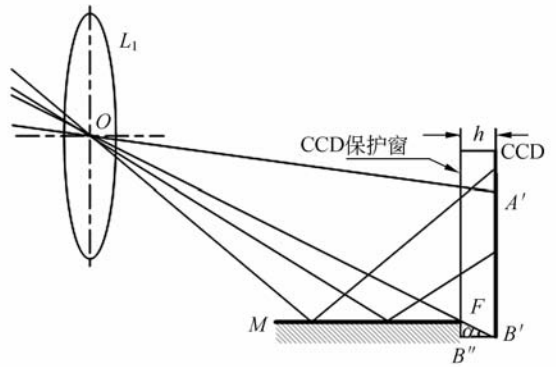
平面反射镜 M 的放置位置和方向可以通过几何计算得出。本文设计的测量系统中探测器采用线阵 CCD,并具有一个和光敏感像元的距离为 h 起保护作用的玻璃窗。系统中平面镜 M 不能置于 CCD 的 B'' 处,因为这样照在 FB'' 之间的像点会超出 CCD 的探测范围,从而无法被 M 反射而不能进行测量,如图 6(a) 所示,设光线 FB'' 交 OB' 于 F 点,则 M 应安装于 F 点,由图 6(a) 中的几何关系可知:

$$B''F = h \tan \alpha . \tag{14}$$

测量系统中选用的线阵 CCD 的 h 参数值约为 1.72 mm,根据测量原理可计算出 3 种测量范围下的 $B''F$ 值分别为:0.860 0,1.720 0,1.720 0 mm,在这里统一取 $B''F=1.800 0$ mm。



(a)



(b)

图 6 平面反射镜的放置位置

Fig. 6 Placement of reflector

5 测试实验

图 7 为测量系统的结构简图,由于本文设计的测量系统精度较高,所以标定精度直接决定了测量系统的精度。目前测量系统常用的标定技术有细丝散射法、齿形靶标法以及交比不变法等^[14],在这里采用虚拟相位靶标方法实现测量系统的标定^[15]。为了验证测量系统的可行性,以 L_1 为例,建立以透镜 L_0 的焦点 O_1 为原点的三维直角坐标系, y 轴方向通过物镜的中心,如图 8 所

示。系统中选用 TCD1703C 型号线性 CCD;其像敏单元长为 $7\ \mu\text{m}$,高为 $7\ \mu\text{m}$,中心距也为 $7\ \mu\text{m}$,有效像元数为 7500 个,像敏区总长为 52.5 mm,最高工作频率可达 20 MHz;美国生产的 Melles-Griot-DPSS 型号固体激光器:波长为 532 nm,功率为 10 mW,发出的激光的成像点的面积小于 $1.2\ \text{mm}^2$;大恒新纪元科技股份有限公司的 GCM-5702M 型可变光阑:最大孔径为 12 mm,最小孔径为 1 mm;GCM0901 型偏振片:端面有 3600 个角度刻线。

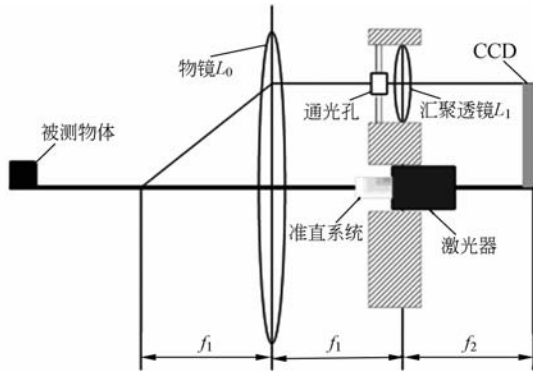


图 7 平面反射镜的放置位置

Fig. 7 Placement of reflector

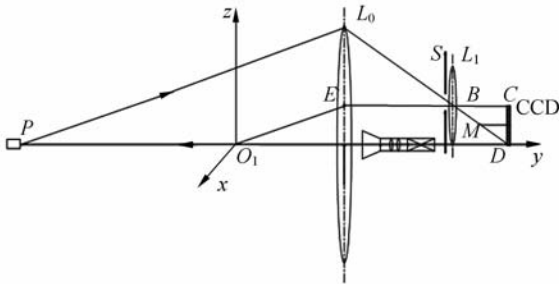


图 8 系统误差分析简图

Fig. 8 Analysis of systematic error

运用惠普公司的 Hp-5528A 型双频干涉仪进行对比实验,其精度高达 $0.1\ \mu\text{m}$,测量对象是机床加工后的两个零件,机械加工零件的材料为 45# 钢,两个零件间的位移可调。采用设计的系统进行测量,并与 Hp-5528A 型双频激光器的测

量结果进行比对。实验结果如表 1,表 2 所示。

表 1 测量数据

Tab. 1 Measurement data

测量次数	f_1/mm	f_2/mm	a/mm	d/mm
1	600	400	150	50.695
2	600	400	150	75.814
3	600	400	150	97.980
4	600	600	100	11.631
5	600	600	100	37.379
6	600	600	100	50.829
7	600	600	100	63.143
8	600	600	100	84.731
9	600	850	75	18.995
10	600	850	75	45.058
11	600	850	75	66.528
12	600	850	75	92.986

表 2 比对实验

Tab. 2 Experimental comparison

测量次数	本系统/mm	惠普干涉仪/mm	误差/ μm
1	304.170	304.127 3	43
2	454.885	454.840 1	45
3	587.881	587.836 2	45
4	669.788	669.744 3	44
5	724.274	724.231 1	43
6	807.973	807.930 1	43
7	978.855	978.811 7	44
8	1108.386	1108.341 6	45
9	1307.265	1307.221 7	44
10	1454.446	1454.400 4	46
11	1575.688	1575.640 6	48
12	1781.572	1781.525 6	47

经过实验可知本文设计的测量系统的测量误差 $< 50\ \mu\text{m}$, 低于惠普干涉仪的精度,但满足机械精密加工精度的要求,所以本文提出的测量方法可以实现大范围内高精度的位移测量。

6 结 论

在激光三角法测量原理的基础上,提出了一种基于虚拟探测器的激光测量新方法,采用 3 个

CCD分段测量的思想,扩大了三角法的测量量程。通过使用平面反射镜作为虚拟探测器进行探测,测量范围得到扩展。通过准直滤光系统缩小在探测器光敏面上的像点直径,减小被测表面非

理想光点对测量的精度的影响,实现了无导轨大尺寸的高精度测量。实验表明,该方法的测量误差 $<50\ \mu\text{m}$,满足机械精密加工的精度要求,验证了该方法是可行的。

参考文献:

- [1] 刘维,韩旭东,艾华. 激光三角法在位移测量中的应用[J]. 2004,12(4):104-107.
LIU W, HAN X D, AI H. Application of laser triangulation in displacement measurement[J]. 2004, 12(4):104-107. (in Chinese)
- [2] 谭海艳,赵小军. 基于激光三角法的零件表面粗糙度在线测量[J]. 机床与液压,2010,38(6):67-68.
TAN H Y, ZHAO X J. Surface roughness real time measurement method of parts based on laser triangulation[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2010, 38(6):67-68. (in Chinese)
- [3] 徐万和,李忠新,吴志林,等. 基于激光三角测量原理的自动机运动测试方法[J]. 测试技术学报,2010, 24(3): 215-218.
XU W H, LI ZH X, WU ZH L, *et al.*. Motion test method based on laser triangulation measurement principle for automatic mechanism[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, 24(3): 215-218. (in Chinese)
- [4] SHIOU F J, LIU M X. Development of a novel scattered triangulation laser probe with six linear charge-coupled devices (CCDs) [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(1):7-18.
- [5] 刘君,刘江春,晏克俊. 光学三角法高精度自动调焦系统设计[J]. 西安理工大学学报,2004,20(1):63-66.
LIU J, LIU J C, YAN K J. Design of high precision automatic focusing system based on method of optic triangle[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2004, 20(1):63-66. (in Chinese)
- [6] 黄战华,蔡怀宇,李贺桥,等. 三角法激光测量系统的误差分析及消除方法[J]. 光电工程,2002,29(3): 58-61.
HUANG ZH H, CAI H Y, LI H Q, *et al.*. Analysis for error in triangular laser measurement system and an elimination method[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2002, 29(3): 58-61. (in Chinese)
- [7] 史亚莉,高云国,张磊,等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4):726-732.
SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(4):726-732. (in Chinese)
- [8] 陈洪芳,钟志,丁雪梅. 激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1043-1047.
CHEN H F, ZHONG ZH, DING X M. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5):1043-1047. (in Chinese)
- [9] 高学海,徐科军,张瀚,等. 基于单目视觉和激光测距仪的位姿测量算法[J]. 仪器仪表学报,2007, 28(8):1479-1485.
Gao X H, XU K J, ZHANG H, *et al.*. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(8):1479-1485. (in Chinese)
- [10] 雷琳君,杨燕,陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. 中国激光,2007, 34(10): 1422-1426.
LEI L J, YANG Y, CHEN W B. High-accuracy time-interval-unit for space borne laser range finder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(10): 1422-1426. (in Chinese)
- [11] 曾宪阳,张志良. PSD 激光三角法弱反射微振动测量系统[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版),

2009,32(3):298-302.

ZENG X Y, ZHANG ZH L. A system measuring micro vibration in weak reflection based on PSD and laser triangulation method [J]. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2009,32(3):298-302. (in Chinese)

[12] QI L T, NAMBA Y. Precision laser adjustment using CW diode laser [J]. *Precision Engineering*, 2011,35(1): 126-132.

[13] ALFREDO C, FEDERICO M, STEFANO M, *et al.*. Laser-triangulation device for in-line measurement of road texture at medium and high speed [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(7):2225-2234.

[14] 张维光,赵宏,张琦,等. 线结构光三维轮廓测量系

统的标定方法 [J]. *中国激光*, 2009, 36(1):182-188.

ZHANG W G, ZHAO H, ZHANG Q, *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009,36(1):182-188. (in Chinese)

[15] 林玉池,张晓玲,牛小兵,等. 基于虚拟相位靶标的光栅投影三维测量系统标定 [J]. *光电子·激光*, 2005,16(5):591-595.

LIN Y CH, ZHANG X L, NIU X B, *et al.*. Calibration method for grating projection profilometry system using virtual phase calibrating model plane [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(5):591-595. (in Chinese)

作者简介:



李雅倩(1982—),女,湖南岳阳人,博士,讲师,2006年于燕山大学获得硕士学位,2010年于法国鲁昂国立应用科学学院获得博士学位,主要从事光学测量,立体视觉及模式识别等方面的研究。E-mail: yaqian.li@ysu.edu.cn



周坤(1982—),男,2006年、2008年分别于燕山大学获工学学士、工学硕士学位,研究方向为激光检测和大尺寸测量等。



付献斌(1985—),男,河北邯郸人,硕士研究生,2009年于燕山大学获得学士学位,主要研究方向为激光检测和信号处理。E-mail: fuxianbin@yahoo.cn