

文章编号: 1005-5630(2015)04-0314-05

用于小零件图像测量的双远心光学系统

夏 兵, 王 敏, 郭巧双, 王 芬

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 为了能精确得到被测物体的几何参数, 设计了一种采集物体图像的双远心光学系统, 并通过数字图像处理技术对物体尺寸进行测量。用 Zemax 对系统进行优化, 分析了系统的像差和传递函数, 所设计系统的工作距离大于 74 mm, 物方视场直径达到 80 mm, 畸变小于 0.11%, CCD 全视场 190 lp/mm 处传递函数大于 0.3。分析了光学系统的放大倍率稳定性和测量误差, 并对小零件进行了测量, 测量误差在允许的范围, 符合测量要求。

关键词: 图像测量; 数字图像处理; 双远心光学系统; 光学设计

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.007

Bilateral telecentric system for image measurement of small parts

XIA Bing, WANG Min, GUO Qiaoshuang, WANG Fen

(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine(Ministry of Education), School of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to accurately get the geometric parameters of an object, we designed a bilateral telecentric optical system to collect images of the object and measured the size of object by digital image processing techniques. We used Zemax to optimize the system, analyzed the aberration of the image and the transfer function of the system. The system had a long working distance which was greater than 74 mm. The field-of-view was 80 mm. The largest distortion was less than 0.11 percent and MTF was larger than 0.3 at 190 lp/mm for full field region of the CCD sensor. We analyzed the stability of the magnification and measurement deviation, and measured the small parts. The deviation was in the required range.

Keywords: image measurement; digital image processing; bilateral telecentric optical system; lens design

引 言

随着工业生产的发展,对微小零件几何尺寸的测量效率、精度、实时性要求越来越高,而传统的接触测量不能对易变形、易碎、高温等材料进行测量,并且其测量精度低、耗时长、存在很大的局限性。现有的图像测量仪器如三坐标仪、圆柱度测量仪等,因其成本高、测量耗时长且有一定的工作环境要求,只适用于检测室,而在工厂的生产线上不适用。因此利用物体图像结合数字图像处理技术测量物品尺寸,以实

收稿日期: 2014-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61275216)

作者简介: 夏兵(1988—)男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: bingbing208@yeah.net

通信作者: 王敏(1963—)女,教授级高级工程师,主要从事光学工艺及产品的研究开发。E-mail: mwang@fjnu.edu.cn

现非接触、在线快速、高精度测量^[1]。但是图像处理的前提是先要获取高分辨率、高对比性和低几何形变的图像,普通光学镜头因工作距离的变化,视角选择的不同,会引起图像的变形,进而影响测量的精度。远心镜头依据其独特的光学特性,能有效降低上述问题^[2-4],因此远心镜头可用于三维目标的非接触测量,如精密机械组件的尺寸测量,塑料零件测量,玻璃及药用容器测量,电子组件测量等。

1 图像测量系统构成

图像测量系统如图1所示,主要由照明系统、图像采集系统、数据处理系统和机械结构等组成。图像测量系统通过高分辨率的镜头获得物体的图像,利用数字图像技术对图像的边缘进行处理和计算,从而得到被测物体的几何参数并显示输出。

1.1 双远心镜头原理简介

一般远心光路分为物方远心光路和像方远心光路。在物方远心镜头中,孔径光阑设置在镜头的像方焦平面上,物方主光线平行于光轴^[5-6]。像方远心镜头中孔径光阑设置在镜头的物方焦平面上,像方主光线平行于光轴,因此像方远心镜头对图像传感器位置的微小变化不敏感^[7-8]。而双远心镜头综合了物方远心镜头和像方远心镜头的优点对微小的物距和像距变化均不敏感。

1.2 普通镜头与远心镜头成像特性对比

在普通镜头下,物体的图像大小会因物体与镜头的距离 s 不同而改变,因此对于不同大小的目标可能会受物距的影响而看起来相同,如图2所示,这对于图像测量是不利的,必需消除。远心镜头则能允许一定程度的距离改变,在“限定景深”或“远心度区间”内,图像不会因物体与镜头间距离的改变而放大或缩小。这是因为只有与光轴平行的光束才会被接收,因此远心镜头通光口径必须大于或等于被摄物体的直径^[9-12]。远心镜头的这个特性很适用于图像测量。

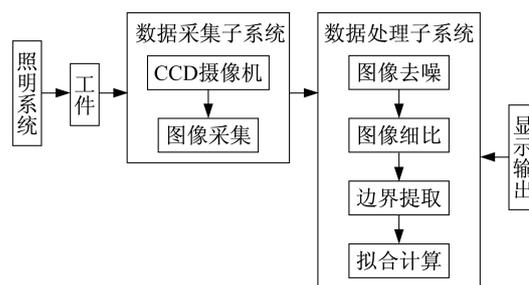


图1 图像测量系统结构

Fig. 1 Structure of the image measurement system

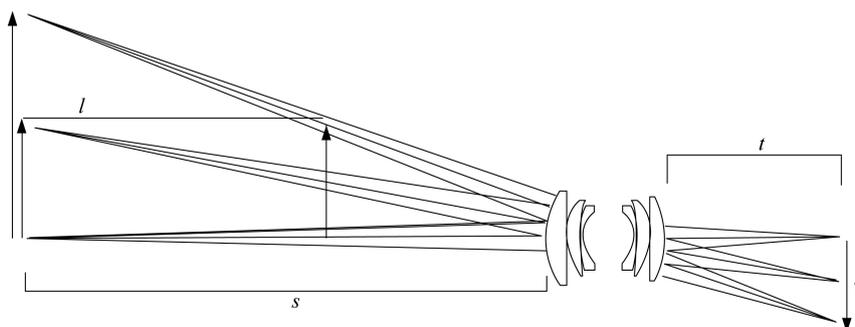


图2 普通镜头

Fig. 2 Conventional lens

1.3 光学系统设计要求

由于本图像测量系统主要针对小型轴类零件的直径测量,通过被测量物体在CCD上成像的大小计算出被测物体几何尺寸,因此为保证测量精度,物镜设计除考虑较低的畸变外,还必须保证光学系统的放大率 β 保持一致,其计算公式为

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (1)$$

式中: y 为被测物体的高度; y' 为被测物体图像的高度; β 为物镜的放大率。

物镜的成像质量对测量精度产生直接的影响,特别是畸变的大小是影响测量精度的主要因素。

1.4 光学系统参数

根据被测物体的参数,相应的光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Optic system parameters

参数	数值
入瞳直径/mm	800
图像放大率	0.1
物方视场/mm	80
像方视场/mm	8
物像共轭距/mm	260
物方工作距/mm	74
物方远心度/(°)	0.05
像方远心度/(°)	0.30

2 光学系统设计优化

2.1 光学系统设计及像质评价

选取合适的初始结构,如图 3 所示,可以看到由 7 片镜片组成。利用 Zemax 软件通过控制光线的出射角、入射角及系统的放大倍率,并对曲面和玻璃等参数进行全面优化,最终得到如图 4 示的双远心光学系统结构图。可以看到系统的第 2、3 片,第 4、5 片成为了双胶合镜片,使系统易于加工装配,从而减小装配误差对系统的影响。



图 3 双远心系统初始结构图
Fig. 3 Original layout of bilateral telecentric lens

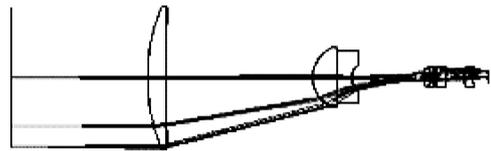


图 4 双远心系统结构图
Fig. 4 Layout of bilateral telecentric lens

该双远心镜头经过优化以后的 MTF 曲线如图 5 所示,由图可见到全视场 190 lp/mm 处 MTF 值大于 0.3,并接近衍射极限。图 6 是系统的场曲和畸变图,图 7 是系统的倍率色差图,图 8 是系统的点列图。

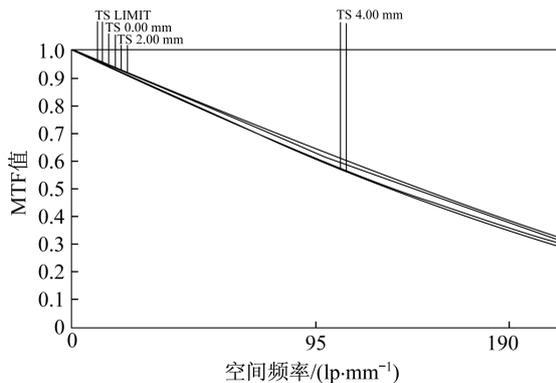


图 5 传递函数图
Fig. 5 MTF

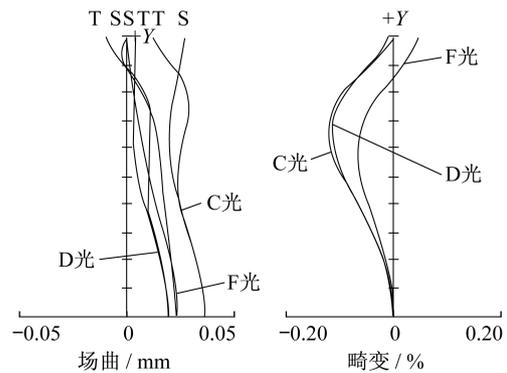


图 6 场曲、畸变
Fig. 6 Field curve and distortion

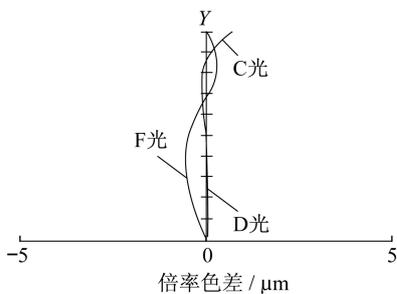


图 7 倍率色差图
Fig. 7 Lateral color aberration

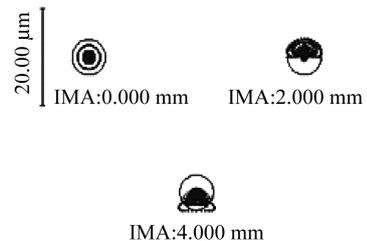


图 8 点列图
Fig. 8 Spot diagram

根据图5~8该远心镜头的部分像差评价结果可以得出:所有视场190 lp/mm处传递函数均大于0.3,各视场星点均在爱里斑范围内,边缘视场平均值最大为1.65 μm ;最大畸变也控制在0.11%以内,使得图像的变形小于1个像素;各谱线的倍率色差约在0.5 μm 以内,均在爱里斑半径内,也远小于像素大小。

2.2 系统公差分析

由于图像测量的精度要求较高,镜头的设计除了要考虑成像质量外还要兼顾零件的公差要求。因此本设计分别对透镜的曲率半径施以4个光圈的公差,厚度施以0.03 mm的公差,透镜的表面X、Y方向分别施以0.025 mm的倾斜公差和0.05 mm的偏心公差,透镜光轴X、Y方向施以0.114°的倾斜公差和0.05 mm的偏心公差。计算出以上的公差对传递函数MTF的影响,其中敏感程度最大的几个公差(按敏感程度递减的顺序排列)如表2所示。

由表2可以看出对系统的传递函数影响最大的几个公差分别是第3、4、5表面之间的厚度公差,第8个面X、Y方向的倾斜公差,第6个面Y方向的倾斜公差以及第一组双胶合镜片整体的倾斜公差。因此在加工装配的过程中要注意控制这几个面的厚度公差和倾斜公差,保证系统的成像质量。

2.3 系统放大倍率稳定性及误差分析

图像测量时微小的物距变化会引起放大率的变化,将对测量结果造成一定的误差,因此放大倍率的稳定性也是影响测量精度的一个重要因素。表3是通过改变物距得出系统的放大倍数的变化率,其中初始物距为74 mm,物距变化范围为 ± 5 mm。

表3是放大倍数随着物距改变的变化率,物距变化 ± 5 mm,放大倍数变化率均在0.18%以内,可以看出该双远心系统的放大倍率稳定性很好,有助于减小测量误差。对测量结果影响最大的是畸变,根据系统的畸变可以计算出测量误差,其计算公式为

$$\alpha = D \times \beta \times \delta \quad (2)$$

式中: α 为测量误差(单位为 μm); D 为待测物体直径(单位为 μm); β 为光学系统放大倍率; δ 为光学系统畸变。

本光学系统放大倍率 β 为0.1,畸变 δ 为0.1%,畸变造成的测量误差为 $D/10\ 000$ 。

3 图像采集与测量

使用摄像机取得被测轴的图像并存储到计算机,用MATLAB对图像的边缘进行处理得到边缘特征提取图像,如图9所示,然后拟合出直线,如图10所示,计算出直线的方程,并对两直线间的距离求平均值得到轴的直径。

根据拟合直线的方程可以计算出2条平行线间的距离,再对相机进行尺寸标定即可得出轴的直径。采用三坐标测量仪与本文图像测量系统对不同的圆柱轴进行了实际测量,测得轴的直径 D_i ($i=1,2,3$)如表4所示。

根据表4的测量结果,可以知道本文设计的图像测量系统对不同的轴的测量误差分别为5.5 μm 和11.9 μm ,符合实际测量要求,造成误差的原因是系统安装、定位以及标定的过程有误差,经合理控制还可进一步提高测量精度。

表2 几个最敏感的公差

Tab. 2 Several sensitive errors

公差类型	表面编号	公差值	MTF变化量
厚度公差/mm	3,4,5	0.030	-0.091
厚度公差/mm	4,5	0.030	-0.089
倾斜公差(X)/mm	8	± 0.025	-0.084
倾斜公差(Y)/mm	8	± 0.025	-0.060
倾斜公差(Y)/mm	6	± 0.025	-0.044
倾斜公差(Y)/(°)	3,4,5	± 0.114	-0.027

表3 放大倍数的变化率

Tab. 3 Magnification rate

物距/mm	放大倍数	放大倍数变化率/%
69	0.100 25	0.18
70	0.100 21	0.15
71	0.100 18	0.11
72	0.100 14	0.07
73	0.100 11	0.04
74	0.100 00	0.00
75	0.100 04	0.03
76	0.100 06	0.06
77	0.099 97	-0.09
78	0.099 94	-0.13
79	0.099 90	-0.17

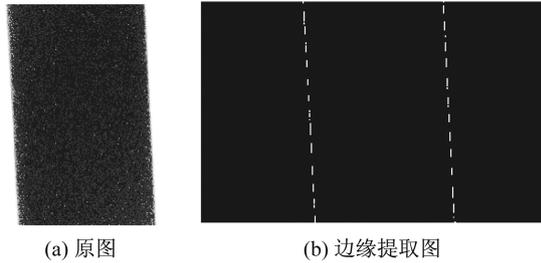


图 9 边缘特征提取图
Fig. 9 Image contour extraction

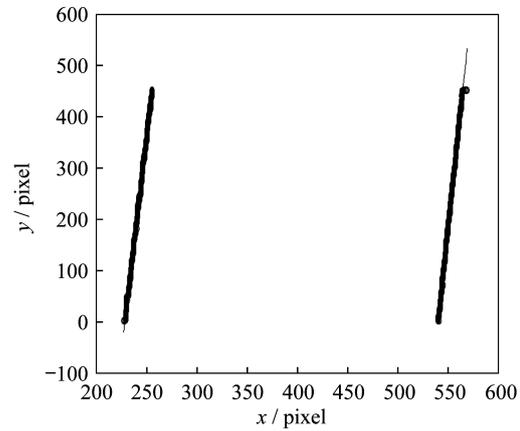


图 10 拟合直线图
Fig. 10 Fitting line diagram

表 4 不同轴的实际测量结果

Tab. 4 The measurement results of misalignment

测量仪器	被测轴	直径 $D_1 / \mu\text{m}$	直径 $D_2 / \mu\text{m}$	直径 $D_3 / \mu\text{m}$	直径平均值 / μm	误差值 / μm
三坐标仪	轴 1	3 108.5	3 109.2	3 098.6	3 105.4	
图像测量系统	轴 1	3 098.2	3 099.9	3 101.2	3 099.9	5.5
三坐标仪	轴 2	1 581.9	1 579.4	1 582.7	1 581.3	
图像测量系统	轴 2	1 568.8	1 569.2	1 570.1	1 569.4	11.9

4 结 论

图像测量具有广阔的发展前景,可以实现非接触、在线快速和高精度测量,对易碎、易变形物体和工厂在线检测具有重要的意义。双远心光学系统是图像检测系统较理想光路,不仅系统畸变很小,而且还可确保视场内放大倍率的一致,因此可以很好地解决动态在线测量问题和被测物体特征不在同一平面的问题,提高测量精度。本文给出的双远心光学系统工作距离大于 74 mm,物方视场达到 80 mm,畸变小于 0.11%,在全视场 190 lp/mm 处传递函数大于 0.3,较好地控制了畸变,保证了放大倍率的稳定性。给出了公差分析结果,这结果对于加工装配有一定的参考价值。轴的实测结果表明,该光学系统的测量误差在允许的范围,符合测量要求。

参考文献:

[1] 林晓峰,石少莉. CCD 摄像法在工件尺寸测量中的应用[J]. 光学仪器,2002,24(3):11-13.
 [2] 林峰. 基于机器视觉检测的大视场双远心光学系统设计[J]. 光学与光电技术,2010,8(1):67-71.
 [3] 潘兵,俞立平,吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报,2013,33(4):0412004-1-0412004-11.
 [4] 李洪海,王敬东. 摄像机标定技术研究[J]. 光学仪器,2007,29(4):7-12.
 [5] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 2 版. 杭州:浙江大学出版社,2007.
 [6] 李欢,向阳. 10°远心离轴三反消像散望远系统的光学设计[J]. 光子学报,2009,38(9):2256-2260.
 [7] 樊学武,陈荣利,马臻,等. 偏心和倾斜光学系统初级像差理论的研究[J]. 光子学报,2004,33(4):494-496.
 [8] 梅丹阳,焦明印. 变焦距投影光学系统中的远心光路设计[J]. 应用光学,2006,27(4):264-267.
 [9] 周焯锋,邱慧娟,李卓,等. 基于远心光学系统散焦图像的距离估计[J]. 红外与激光工程,2006,35(增刊):534-537.
 [10] 倪争技,张永康. 亚像素理论在图像边界处理中的应用研究[J]. 光学仪器,2006,28(3):46-51.
 [11] 李同海,王海霞,赵新亮,等. 像方远心航拍数码相机镜头设计[J]. 光电工程,2011,38(3):25-28.
 [12] 唐正宗,梁晋,郭成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J]. 光学学报,2011,31(11):1112007-1-1112007-9.

(编辑:刘铁英)